This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

LOEB MUSIC LIBRARY
ML 17M2 W

Sammlung Göschen

Musikalische Akustik

von

Dr. Karl L. Schaefer

Mit 35 Abbildungen

ammlung Göschen.

Mus 99.774

Harvard College Library

FROM

By Exchange

MUSIC LIBRARY

...riß von Prof.
...r, Dir... des Pädagog.
...ars an der ...iversität Jena.

Digitized by Google

Sammlung Göschen

Je in elegantem Leinwandband **80 Pf.**

18 **Geologie** von Professor Dr. Eberh. Fraas in Stuttgart. Mit 16 Abbildungen und 4 Tafeln mit über 50 Figuren.

14 **Psychologie und Logik** zur Einführung in die Philosophie von Dr. Th. Elsenhans. Mit 13 Figuren.

15 **Deutsche Mythologie** von Dr. Friedrich Kauffmann, Professor an der Universität Kiel.

16 **Griechische Altertumskunde** von Prof. Dr. Rich. Maisch, neu bearbeit. v. Rektor Dr. Franz Pohlhammer. Mit 9 Vollbildern.

17 **Aufsatzentwürfe** von Dr. L. W. Straub, Professor an d. Oberprima des Eberhard-Ludwigs-Gymnasiums in Stuttgart.

18 **Der menschliche Körper, sein Bau und seine Thätigkeiten,** von E. Rebmann, Oberrealschuldirektor in Freiburg i. B. Mit Gesundheitslehre v. Dr. med. H. Seiler. Mit 47 Abbildungen und 1 Tafel.

19 **Römische Geschichte,** neu bearb. von Dr. Julius Koch, Oberlehrer am Bismarckgymnasium in Berlin.

20 **Deutsche Grammatik** und kurze Geschichte der deutschen Sprache von Schulr. Prof. Dr. O. Lyon in Dresden.

21 **Musikalische Akustik** von Dr. Karl L. Schäfer. Mit vielen Abbildgn.

22 **Hartmann von Aue, Wolfram von Eschenbach** und **Gottfr. von Straßburg.** Auswahl aus dem höf. Epos mit Anmerkungen und Wörterbuch von Dr. K. Marold, Professor am kgl. Friedrichskollegium zu Königsberg i. Pr.

23 **Walther von der Vogelweide** mit Auswahl aus Minnesang und Spruchdichtung. Mit Anmerkungen und einem Wörterbuch. Von Otto Güntter, Professor an d. Oberrealschule und an der Techn. Hochschule in Stuttgart.

24 **Hans Sachs u. Johann Fischart** nebst einem Anhang: Brant und Hutten. Ausgewählt und erläutert v. Dr. Jul. Sahr, Professor am Kgl. Kadettenkorps in Dresden.

25 **Das deutsche Volkslied,** ausgew. und erläutert von Dr. Jul. Sahr, Prof. am Königlichen Kadettenkorps in Dresden.

26 **Physische Geographie** von Dr. Siegmund Günther, Professor an der Kgl. Technischen Hochschule in München. Mit 32 Abbildungen.

27 **Griechische und römische Götter- und Heldensage** von Dr. Herm. Steuding, Professor am Kgl. Gymnasium in Wurzen.

28 **Althochdeutsche Litteratur** mit Grammatik, Uebersetzung und Erläuterungen v. Th. Schauffler, Professor am Realgymnasium in Ulm.

29 **Mineralogie** von Dr. R. Brauns, Professor an d. Universität Gießen. Mit 130 Abbildungen.

30 **Kartenkunde,** geschichtlich dargest. von E. Gelcich, Direktor d. k. k. Nautischen Schule in Lussinpiccolo und F. Sauter, Professor am Realgymnasium in Ulm, neu bearb. von Dr. Paul Dinse, Assistent der Gesellschaft f. Erdkunde in Berlin. Mit 70 Abb.

31 **Geschichte d. deutschen Litteratur** von Dr. Max Koch, Professor a. d. Universität Breslau.

32 **Die deutsche Heldensage** von Dr. Otto Luitpold Jiriczek, Professor an d. Akademie Münster.

33 **Deutsche Geschichte im Mittelalter** (bis 1500) von Dr. F. Kurze, Oberlehrer a. Kgl. Luisengymnasium in Berlin.

36 **Der Cid.** Geschichte des Don Ruy Diaz, Grafen von Bivar. Von J. G. Herder. Hrsg. u. erläutert von Prof. Dr. Ernst Naumann i. Berlin.

37 **Anorganische Chemie** von Dr. Jos. Klein i. Waldhof b. Mannheim.

38 **Organische Chemie** von Dr. Jos. Klein in Waldhof b. Mannheim.

39 **Zeichenschule** von Professor K. Kimmich in Ulm. Mit 17 Tafeln in Ton-, Farben- und Golddruck u. 135 Voll- und Textbildern.

40 **Deutsche Poetik** v. Dr. K. Borinski, Dozent an der Universität München.

41 **Ebene Geometrie** von G. Mahler, Professor der Mathematik am Gymnasium in Ulm. Mit 111 Fig.

Digitized by Google

Wenden!

42 **Urgeschichte der Menschheit** von Dr. Moritz Hoernes, Professor a. d. Universität und Custosadjunkt am k. und k. naturhistor. Hofmuseum in Wien. Mit 48 Abb.

43 **Geschichte des alten Morgenlandes** von Dr. Fr. Hommel, Professor an der Universität München. Mit 6 Bildern und 1 Karte.

44 **Die Pflanze**, ihr Bau und ihr Leben von Oberlehrer Dr. E. Dennert in Üngsdorf. Mit 96 Abbildungen.

45 **Römische Altertumskunde** v. Dr. Leo Bloch, Dozent a. d. Universität Zürich. Mit 8 Vollbildern.

46 **Das Waltharilied**, im Versmaße der Urschrift übersetzt und erläutert von Professor Dr. H. Althof, Oberlehrer a. Realgymnasium i. Weimar.

47 **Arithmetik und Algebra** von Dr. Herm. Schubert, Professor an der Gelehrtenschule des Johanneums in Hamburg.

48 **Beispielsammlung z. Arithmetik u. Algebra**, 2765 Aufgaben, systematisch geordnet, von Dr. Hermann Schubert, Professor an der Gelehrtenschule des Johanneums i. Hamburg.

49 **Griechische Geschichte** von Dr. Heinrich Swoboda, Professor an d. deutschen Universität Prag.

50 **Schulpraxis.** Methodik d. Volksschule von A. Seyfert, Schuldirektor in Olsnitz i. V.

51 **Mathemat. Formelsammlung** u. Repetitorium der Mathematik, enth. die wichtigsten Formeln u. Lehrsätze der Arithmetik, Algebra, algebraischen Analysis, ebenen Geometrie, Stereometrie, ebenen u. sphärischen Trigonometrie, mathem. Geographie, analyt. Geometrie der Ebene und des Raumes, der Differential- und Integralrechnung v. O. Th. Bürklen, Professor am kgl. Realgymnasium in Schw.-Gmünd. Mit 18 Figuren.

52 **Geschichte der römischen Litteratur** von Dr. Hermann Joachim in Hamburg.

53 **Niedere Analysis** von Professor Dr. Benedikt Sporer in Ehingen. Mit 5 Figuren.

54 **Meteorologie** von Dr. W. Trabert, Dozent a. d. Universität u. Sekretär der k. k. Zentralanstalt für Meteorologie in Wien. Mit 49 Abb. u. 7 Taf.

55 **Das Fremdwort im Deutschen** v. Dr. Rudolf Kleinpaul i. Leipzig.

56 **Deutsche Kulturgeschichte** v. Dr. Reinh. Günther i. Burgdorf b. Bern.

57 **Perspektive** nebst einem Anhang über Schattenkonstruktion u. Parallelperspektive von Architekt Hans Freyberger, Fachlehrer an der Kunstgewerbesch. i. Magdebg. Mit 88 Abb.

58 **Geometrisches Zeichnen** von H. Becker, Architekt und Lehrer an der Baugewerkschule i. Magdeburg. Mit 282 Abbildungen.

59 **Indogermanische Sprachwissenschaft** von Dr. R. Meringer, Professor a. d. Universität Wien. Mit einer Tafel.

60 **Tierkunde** v. Dr. Franz v. Wagner, Professor an der Universität Gießen. Mit 78 Abbildungen.

61 **Deutsche Redelehre** von H. Probst, Gymnasiallehrer in München. Mit einer Tafel.

62 **Länderkunde von Europa** v. Dr. Franz Heiderich, Professor am Francisco-Josephinum in Mödling. Mit 14 Textkärtchen und Diagrammen u. einer Karte der Alpeneinteilung.

63 **Länderkunde der außereuropäischen Erdteile** von Dr. Franz Heiderich, Professor am Francisco-Josephinum in Mödling. Mit 11 Textkärtchen und Profilen.

64 **Deutsches Wörterbuch** von Dr. Ferdinand Detter, Professor an der Universität Prag.

65 **Analytische Geometrie** d. Ebene von Professor Dr. M. Simon in Straßburg. Mit 57 Figuren.

66 **Russische Grammatik** von Dr. Erich Berneker, Privatdozent a. der Universität Berlin.

67 **Russisches Lesebuch** mit Glossar von Dr. Erich Berneker, Privatdozent a. d. Universität Berlin.

68 **Russisch-deutsches Gesprächsbuch** von Dr. Erich Berneker, Privatdozent an der Universität Berlin.

Fortsetzung auf der 4. Vorsatzseite

Sammlung Göschen

Musikalische Akustik

von

Dr. Karl L. Schaefer
Privatdozent an der Universität Berlin

Mit 35 Abbildungen

Leipzig
G. J. Göschen'sche Verlagshandlung
1902

Digitized by Google

Mus 288.1.46
Harvard College Library
By Exchange

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht,
von der Verlagshandlung vorbehalten.

Spamersche Buchdruckerei, Leipzig.

Digitized by Google

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Literaturverzeichnis	5
Die Gehörswahrnehmungen	7
Die Töne	7
Physikalisches	8
Physiologische und musikalische Tonreihen	17
Weitere physiologische und psychologische Eigenschaften einfacher Töne	25
Die Klänge	28
Entstehung und Darstellung der Klangwelle	29
Die Resonanz	33
Klanganalyse und Klangfarbe	38
Das Ohr und die Helmholtzsche Theorie des Hörens	45
Anatomie des Gehörorganes	46
Begründung der Resonanzhypothese	50
Die sekundären Klangerscheinungen	52
Die Schwebungen	53
Die Kombinationstöne	59
Die Tonerzeugung und die wichtigsten Instrumente	65
Die Saiten und Saiteninstrumente	65
Die transversalen Saitenschwingungen	66
Die Klänge der Saiteninstrumente	71

Digitized by Google

Seite

Die Blasinstrumente 76
Stehende Longitudinalschwingungen 77
Die Flöten 82
Die Lippenpfeifen der Orgel 88
Die Zungenpfeifen der Orgel 97
Die Holzblasinstrumente mit Zungen 104
Die Blechblasinstrumente 108

Die menschliche Stimme 118
Bau des Kehlkopfes 119
Stimmbildung 124

Die Töne in musikalischer Beziehung 131

Konsonanz, Dissonanz und Tonverwandtschaft . 132
Die älteren Lehren und die Theorie von Helmholtz . . 133
Die Theorie von Stumpf 137
Die dualistische Konsonanzdefinition 141

Leiterbildung 145
Quintenleitern (Pythagoreische Leitern) 146
Quint-Terz-Leitern oder Dreiklangsleitern 148
Alterierte Töne und chromatische Leitern 150
Unsere „Tonarten“ 152
Enharmonische Unterschiede und temperierte Leitern . . 155

Digitized by Google

Literaturverzeichnis.

Abraham, Das absolute Tonbewußtsein, Sammelhefte der Internationalen Musikgesellschaft. Leipzig 1901.

Ambros, Geschichte der Musik. 5 Bände, 3. Auflage. Leipzig 1881—1893.

Apian-Bennewitz, Die Geige, der Geigenbau und die Bogenverfertigung. Weimar 1892.

Bähr, Das Tonsystem unserer Musik. Leipzig 1882.

Bellermann, Die Tonleitern und Musiknoten der Griechen. Leipzig 1847.

Blüthner und Gretschel, Lehrbuch des Pianofortebaues. 2. Auflage. Weimar 1886.

Chladni, Die Akustik. Leipzig 1830.

Eichborn, Die Trompete in alter und neuer Zeit. Leipzig 1881.

— Die Dämpfung beim Horn oder die musikalische Natur des Horns. Leipzig 1897.

Elsas, Der Schall. Leipzig 1886.

Ewald, Die Physiologie des Kehlkopfes und der Luftröhre; Stimmbildung: in Heymanns Handbuch der Laryngologie und Rhinologie. Wien 1898.

Flatau, Hygiene des Kehlkopfes und der Stimme; Stimmstörungen der Sänger: in Heymanns Handbuch der Laryngologie und Rhinologie. Wien 1898.

Grützner, Physiologie der Stimme und Sprache: in Hermanns Handbuch der Physiologie. Leipzig 1879.

Hauptmann, Die Natur der Harmonik und Metrik. Leipzig 1873.

v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. 5. Ausgabe. Braunschweig 1896; u. a.

Hofmann, Katechismus der Musikinstrumente. 5. Auflage. Leipzig 1890.

Jonquière, Grundriß der musikalischen Akustik. Leipzig 1898.

Koenig, Quelques expériences d'acoustique. Paris 1882.

Mackenzie, Singen und Sprechen. 2. Auflage. Hamburg und Leipzig 1901.

Mandl, Gesundheitslehre der Stimme. Braunschweig 1876.

Melde, Akustik. Leipzig 1883.

Digitized by Google

Michael, Bildung der Gesangsregister. Hamburg und Leipzig 1887.
Opelt, Über die Natur der Musik. Leipzig 1834.
v. Öttingen, Das Harmoniesystem in dualer Entwickelung. Dorpat und Leipzig 1866.
Preyer, Über die Grenzen der Tonwahrnehmung. Jena 1876.
— Akustische Untersuchungen. Jena 1879.
Rayleigh, Die Theorie des Schalles. Braunschweig 1880.
Riemann, Musiklexikon. 5. Auflage. Leipzig 1900.
— Katechismus der Akustik (Musikwissenschaft). Leipzig 1891; u. a.
Schwebler, Katechismus der Flöte und des Flötenspiels. Leipzig 1897.
Stumpf, Tonpsychologie. 2 Bände. Leipzig 1883 und 1890.
— Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft. Heft 1: Konsonanz und Dissonanz. Leipzig 1898; u. a.
Töpfer, Lehrbuch der Orgelbaukunst. Weimar 1855.
— Die Orgel. Erfurt und Leipzig 1862.
Töpfer-Allihn, Theorie und Praxis des Orgelbaues. 2. völlig umgearbeitete Auflage des Töpferschen Lehrbuches der Orgelbaukunst. Weimar 1888.
Tyndall, Der Schall. Braunschweig 1874.
Weber, E. H. u. W., Wellenlehre. Leipzig 1825.
Welcker von Gontershausen, Der Klavierbau in seiner Theorie, Technik und Geschichte. Frankfurt a. M. 1870.
Wolf, Sprache und Ohr. Braunschweig 1871.
Zamminer, Die Musik und die musikalischen Instrumente. Gießen 1855.
Zellner, Vorträge über Akustik. 2 Bände. Wien und Leipzig 1892.

Digitized by Google

Die Gehörswahrnehmungen.

Man pflegt in der Wissenschaft wie im täglichen Leben alle die mannigfachen Schalleindrücke, die unser Ohr wahrnimmt, in zwei Gruppen zusammenzufassen, in Klänge und Geräusche. Letztere können wir in diesem Buche ganz und gar beiseite lassen. Denn sie sind in akustischer Beziehung noch so wenig untersucht, daß sich darüber kaum etwas Positives sagen läßt, und für die praktische Musik haben sie erst recht keine nennenswerte Bedeutung. Die Klänge sind es, die das Wesen der Musik ausmachen, und da sie, wie bekannt, aus Tönen bestehen, so bilden auch Töne und Tonempfindungen den eigentlichen Gegenstand der musikalischen Akustik.

Die Töne.

Eine Tonempfindung kommt zustande, wenn physikalische Tonschwingungen dem Ohre zugeleitet werden und den Gehörnerven, den Nervus acusticus, einschließlich der nervösen Endgebilde in der Gehirnrinde erregen. Nicht jede beliebige Art von Tonschwingungen ist wahrnehmbar; es müssen dazu gewisse physikalische Bedingungen erfüllt sein. Andererseits entspricht im allgemeinen einer Änderung der physikalischen Verhältnisse eines Tones auch

Digitized by Google

eine Empfindungsänderung. Unsere Tonempfindungen hängen somit in erster Linie von der physikalischen Beschaffenheit der Töne ab, und diese muß daher zunächst erörtert werden.

Physikalisches.

Wenn wir ein Pendel aus seiner Ruhelage entfernen, indem wir es seitwärts in die Höhe heben und dann sich selbst überlassen, beginnt es alsbald unter dem Einflusse der Schwerkraft zu fallen. Da letztere eine fortwährend wirkende, eine konstante Kraft ist, so ist die Bewegung des Pendels keine gleichförmige. Die Geschwindigkeit wächst vielmehr von Moment zu Moment und ist am größten in dem Augenblicke, wo das Pendel im Punkte seiner Ruhelage ankommt. Es wird durch seine lebendige Kraft über diesen Punkt hinausgetrieben und steigt unter nunmehr andauernder Verzögerung der Bewegung durch die Schwere auf der anderen Seite aufwärts. Die Geschwindigkeit wird, rein theoretisch betrachtet, in dem Moment gleich Null, wo das Pendel ebenso hoch gestiegen ist, wie es fallen gelassen wurde. Dann beginnt das Pendel aufs neue zu fallen, und der gesamte Vorgang wiederholt sich. Von ganz ähnlicher Art sind die Tonschwingungen, die in elastischen Körpern durch kleine Verschiebungen einzelner Moleküle hervorgerufen werden. Sobald die verschiebende Kraft aufgehört hat zu wirken, werden die Moleküle durch die elastischen Kräfte, die proportional der Verschiebung sind, zur Gleichgewichtslage zurückgetrieben und führen pendelartige Schwingungen um dieselbe aus.

Nehmen wir an, ein Punkt P bewege sich in dieser Weise auf der Linie AB (Fig. 1). Er soll, von seiner Gleichgewichtslage M ausgehend, zunächst nach der End-

Digitized by Google

lage A gelangen, dann nach M zurückkehren, über M hinaus nach B schwingen und darauf abermals umkehren. Wenn er wieder in M angekommen ist, hat er eine Schwingung vollendet und es beginnt die zweite. Von der Anzahl der Schwingungen, die in einer Sekunde ausgeführt werden, hängt die Tonhöhe ab. Wenn die Zeit, die der Punkt zu einer Schwingung braucht, die Schwingungsdauer, gleich T ist, also beispielsweise gleich $\frac{1}{100}$ Sekunde, so ist die Schwingungszahl (Tonhöhe) $n = \frac{1}{T}$, im eben angenommenen Beispiele daher gleich 100*). Den Abstand

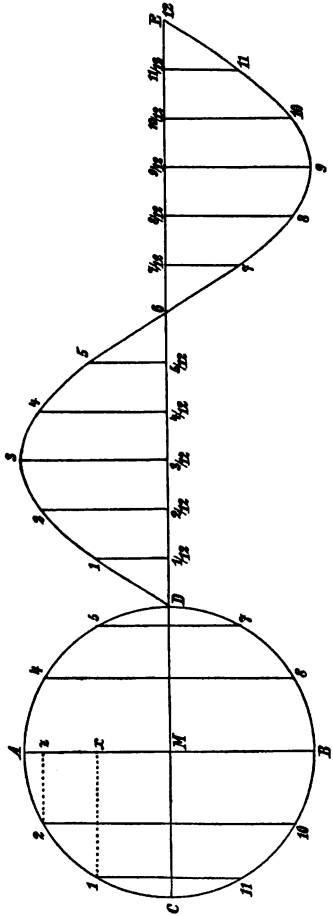


Fig. 1. Konstruktion der Sinuskurve.

*) Anmerkung: Wir sagen also, der Punkt macht eine

Digitized by Google

der Endlage von der Gleichgewichtslage, die Strecke AM oder BM nennt man die Schwingungsweite oder Amplitude. Wie mit der Schwingungszahl die Tonhöhe, so wächst mit der Schwingungsweite die Stärke eines Tones.

Auf mathematisch-physikalischem Wege läßt sich eine Formel ableiten, mit deren Hilfe man feststellen kann, an welchem Orte auf der Linie AB der schwingende Punkt sich in irgend einem Augenblicke befindet. Wenn nämlich eine beliebige Zeit t seit dem Beginne der Bewegung verflossen ist, so ist der Abstand (y) des Punktes von der Gleichgewichtslage zur Zeit t bestimmt durch die Gleichung $y = a \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{t}{T}$, worin a die Amplitude bedeutet. Mit Bezug auf diese Gleichung nennt man die Tonschwingungen auch Sinusschwingungen. Der mit der Mathematik Vertraute ersieht aus der Formel sofort, was schon oben erwähnt wurde, daß y in der Nähe der Gleichgewichtslage am schnellsten, später immer langsamer wächst, und daß sein größter Wert gleich der Amplitude ist. Es lassen sich diese Verhältnisse aber auch graphisch anschaulich machen. Man denke sich ein Pendel, an das unten ein Schreibstift befestigt ist, so über dem Kreise der Figur 1 aufgehängt, daß die Schreibstiftspitze den Punkt M berührt. Wird jetzt das Pendel in der Richtung MA angestoßen, so schwingt der Stift auf der Linie AB

---

ganze Schwingung, wenn er jede Stelle seiner Bahn zweimal passiert hat. Nach der in Frankreich üblichen Bezeichnung ist dies eine Doppelschwingung (vibration double). Die Franzosen berechnen die Tonhöhe nach vibrations simples (v. s.). Eine französische Stimmgabel, die etwa die Tonhöhenbezeichnung 1024 trägt, ist daher unison mit einer deutschen Gabel von der Schwingungszahl 512.

Digitized by Google

hin und her. Hierbei fallen freilich alle y, die sämtlichen Schwingungszustände, des oscillierenden Punktes übereinander auf die Strecke AB, so daß man sie nicht einzeln betrachten kann. Wenn man jedoch nunmehr das schwingende Pendel mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in der Richtung MD oder aber das Papier unter dem Pendel in der Richtung MC verschiebt, so zeichnet der Stift eine Wellenlinie auf das Papier, die die verschiedenen Schwingungszustände nach- und nebeneinander zu Gesicht bringt. Da die Zinken der tönenden Stimmgabeln genau in derselben Weise und nach demselben Gesetze wie ein Pendel, nur sehr viel rascher, hin und her gehen, so benutzt man in der Akustik meist diese zur Demonstration von Pendelkurven. Die Stimmgabel wird zu dem Zwecke mit einer passenden Schreibvorrichtung versehen und vor einem mit konstanter Schnelligkeit rotierenden Cylinder, der mit berußtem Papier überzogen ist, so aufgestellt, daß der Schreibhebel in dem Ruß eine feine Kurve zeichnet. Figur 2 gibt die Abbildung eines solchen Experimentes in schematischer Form: A ist die Gabel, BB die Schreibfläche, b der Schreibstift und cd die gerade Linie, die die Gabel im nichttönenden Zustande zeichnen würde; die Pfeile geben die Bewegungsrichtungen an.

Anstatt nun aber einen in Sinusschwingungen oscillierenden Punkt, wie die Spitze des Schreibstiftes in Figur 2, selbst seine Wellenlinie aufzeichnen zu lassen, kann man dieselbe auch rein geometrisch konstruieren. Beschreiben wir in Figur 1 um den Punkt M einen Kreis mit der Amplitude MA = a als Radius, und nehmen wir an, daß in derselben Zeit T, in welcher der sinusförmig zwischen A und B hin und her pendelnde Punkt eine Schwingung vollführt, ein anderer Punkt einmal

Digitized by Google

auf dem Kreise umläuft und zwar mit gleichmäßiger Geschwindigkeit. Beide Punkte sollen gleichzeitig ihre Bewegung, der eine von C, der andere von M aus, nach A hin beginnen. Nach einer Viertelschwingungsdauer $\left(\frac{1}{4}T\right)$ treffen beide Punkte in A zusammen; nach $\frac{1}{2}T$ ist der eine in D, der andere wieder in M angelangt; nach $\frac{3}{4}T$ befinden sich beide Punkte zusammen in B; zur Zeit T beendigt der eine in C, der andere in M seine Bewegung. Beide Punkte haben also zu den angegebenen Zeiten immer gleichen Abstand von der durch die Gleichgewichtslage gehenden Linie CD. Es läßt sich nun mathematisch zeigen, daß dies ebenso für jeden beliebigen anderen Zeitpunkt gilt. Teilen wir von C ausgehend den Kreis in beliebig viele, sagen wir in zwölf, gleiche Teile, so befindet sich zur Zeit $\frac{1}{12}T$ der kreisende Punkt an der durch 1 bezeichneten Stelle, während der

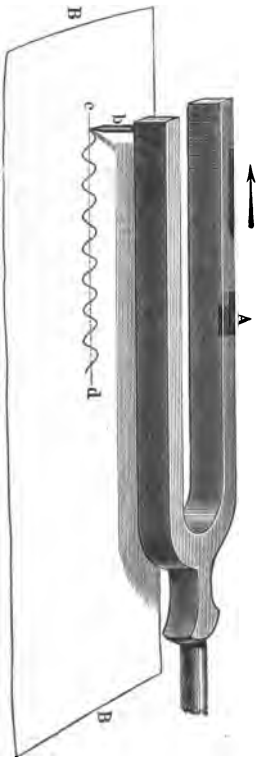


Fig. 2. Pendelschwingungen, von einer Stimmgabel gezeichnet.

Digitized by Google

pendelnde den Ort x einnimmt; dem Punkte 2 des Kreises entspricht ebenso der Punkt z des Durchmessers AB u. s. w. Stellt nun DE (Fig. 1) in vergrößertem Maßstabe die Strecke dar, um die das Papier in Figur 2 unter der Stimmgabel während der Dauer einer Schwingung gleichmäßig vorrückt, so wird die ganze Länge DE in der Zeit T zurückgelegt und je ein Zwölftel derselben in je $\frac{1}{12}$ T. In dem Augenblicke, wo das erste Zwölftel von DE passiert ist, befindet sich der Schreibstift in der Höhe 1 über DE; nach zwei Zwölfteln in der Höhe 2 u. s. f.

Hiernach lautet die praktische Regel für die Konstruktion einer Sinusschwingung: Es wird mit der gegebenen Amplitude a als Radius ein Kreis beschrieben und in möglichst viele gleiche Teile geteilt. Von den Teilpunkten aus werden Lote auf einen zwei von ihnen verbindenden Durchmesser gefällt. Dann errichtet man die nämlichen Lote der Reihe nach in gleichen Abständen auf einer geraden Linie und verbindet ihre Spitzen miteinander. Die Verbindungslinie ist die gesuchte Pendelkurve. [Die Länge der Geraden (DE) ist beliebig. In dem Stimmgabelversuche (Fig. 2) hängt sie außer von der Schwingungsdauer (oder, was auf dasselbe hinausläuft, von der Wellenlänge [s. u.]) des Stimmgabeltones von der gerade gewählten Schnelligkeit des rotierenden Cylinders ab. Die Anzahl der Lote (Ordinaten) darf nicht zu klein resp. ihre Distanz nicht zu groß sein, damit die charakteristischen Abrundungen der Sinuskurve richtig zum Ausdrucke kommen.]

Bringen wir ein Molekül eines elastischen Körpers aus seiner Gleichgewichtslage, indem wir es in eine schwingende Bewegung versetzen, so wird auch die Gleichgewichtslage der benachbarten Punkte gestört und diese

Digitized by Google

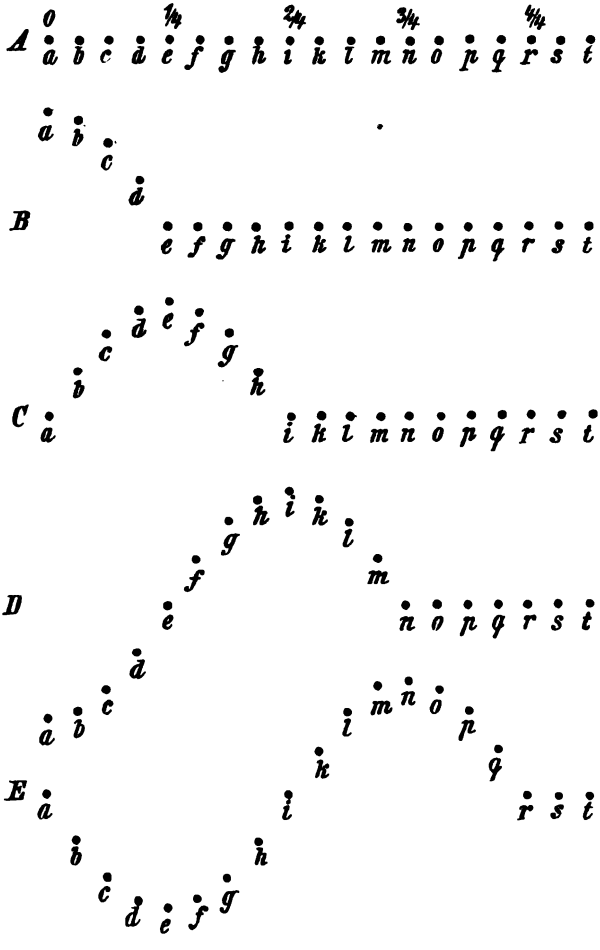


Fig. 3. Fortschreitende Transversalwelle.

Digitized by Google

Störung auf immer weitere übertragen. Es findet also eine Fortpflanzung der Schwingungsbewegung statt. Wir wollen jetzt das Fortschreiten einer Pendelbewegung in einer überall gleichartigen (homogenen) Reihe von Punkten betrachten und dabei zwei Fälle unterscheiden: im ersten (Fig. 3) soll die Schwingungsrichtung der Teilchen senkrecht sein zur Längsrichtung der Reihe, die zugleich die Fortpflanzungsrichtung ist; im zweiten (Fig. 4) sollen beide Richtungen zusammenfallen.

In Fig. 3A sind sämtliche Punkte noch in Ruhe. In Fig. 3B hat Punkt a eine Viertel-Pendelschwingung senkrecht zur Längsrichtung der Punktreihe ausgeführt und ist im Begriffe, zur Gleichgewichtslage zurückzukehren. Die nächsten Nachbarn sind seinem Zuge gefolgt; Punkt e wird im nächsten Augenblicke die Aufwärtsbewegung beginnen. Im Stadium C hat a die Gleichgewichtslage wieder erreicht, e seine höchste Stellung. Die ganze Bewegung ist bis i fortgeschritten. In E endlich hat a eine ganze Schwingung vollführt und ist bereit, eine zweite zu beginnen; ebenso ist Punkt r im Begriffe, die Schwingung zu beginnen. Beide Punkte, a und r, befinden sich, wie man sagt, in gleicher Phase. Den Gesamtzustand der Punkte a bis r in E nennt man eine Welle und unterscheidet daran Wellental (a bis i) und Wellenberg (i bis r). Die Strecke ar ist die Wellenlänge. Mit Rücksicht darauf, daß die Punkte senkrecht zur Längsrichtung schwingen, nennt man die Welle eine transversale. Saiten, Stimmgabeln, Zungen, Platten, Membranen schwingen transversal. Die Übereinstimmung der Kurven in Figur 3E und Figur 1 wird dem Leser sofort auffallen. In der Tat ist auch eine Sinuskurve zugleich das Abbild einer fortschreitenden transversalen pendelförmigen Welle. Denn wie in der Sinuskurve

Digitized by Google

der besseren Übersicht wegen die nacheinander folgenden Schwingungsstadien eines pendelnden Punktes nebeneinander dargestellt werden, so vollführen in der Welle die nebeneinander liegenden Punkte wirklich nacheinander die einzelnen Schwingungszustände der Pendelbewegung.

Schwingen die Punkte in der Fortpflanzungsrichtung selbst statt senkrecht zu ihr, so haben wir es mit einer

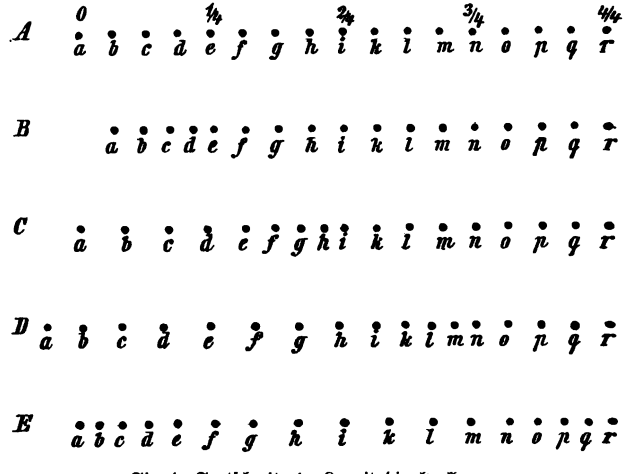


Fig. 4. Fortschreitende Longitudinalwelle.

longitudinalen Welle zu thun. Von dieser Art sind die Tonschwingungen der Luft. Statt der Wellenberge und -täler erhalten wir hier Verdichtungen und Verdünnungen, ein Zusammen- und Auseinanderrücken der Punkte, wie Figur 4 zeigt. Abgesehen von der Richtungsverschiedenheit und der daraus resultierenden Formänderung besteht zwischen transversalen und longitudinalen Schwin-

Digitized by Google

gungen die vollkommenste Analogie. Man pflegt daher auch in graphischen Darstellungen das Bild der longitudinalen Tonwelle durch die anschaulichere Zeichnung der transversalen, also durch die Sinuskurve, zu ersetzen.

Wie aus Figur 3 hervorgeht, schreitet die Bewegung während der Schwingungsdauer T des Punktes a gerade um eine Wellenlänge (l) vorwärts. Für die in einer Sekunde zurückgelegte Wegstrecke, die sogenannte Fortpflanzungsgeschwindigkeit (c), ergibt sich also der Wert $\frac{l}{T}$ oder, da die Schwingungszahl n, wie schon erwähnt, gleich $\frac{1}{T}$ ist, $c = n \cdot l$. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist eine andere in festen Körpern als in Flüssigkeiten und wieder eine andere in Gasen. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft, mit der wir es hier allein zu tun haben, beträgt bei 0^0 ca. 332 m. Sie wächst mit zunehmender Temperatur, ist aber unabhängig von der Qualität des Schalles. Hohe und tiefe Töne pflanzen sich mit gleicher Geschwindigkeit fort.

Physiologische und musikalische Tonreihen.

Die Zahl der physikalisch möglichen verschieden hohen Töne ist unendlich groß. Für die Physiologie des Ohres kommt davon nur ein relativ geringer Bruchteil in Frage. Die physiologische Tonreihe fällt in das untere Ende der physikalischen. Sie beginnt mit etwa 12 bis 16 Schwingungen in der Sekunde — langsamere Schwingungen werden noch nicht als Ton empfunden — und hat eine obere Grenze bei durchschnittlich 20 000 bis 30 000 Schwingungen. Aber auch innerhalb dieser Grenzen vermag das Ohr nicht beliebig viele Töne zu unterscheiden. Sobald die Differenz der Schwingungszahlen zweier Töne

Digitized by Google

unter ein gewisses Minimum sinkt, erscheinen die physikalisch noch verschiedenen Töne in der Empfindung gleich. Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen ist von verschiedenen Autoren untersucht worden, besonders eingehend von Preyer und Luft. Preyer fand, daß bei Tönen zwischen 128 Schwingungen (c^0) und 1024 Schwingungen (c^3) eine Differenz von 0,3 bis 0,5 Schwingungen noch eben wahrgenommen wird, während Luft etwas kleinere Zahlen erhielt. In der Nähe der unteren und oberen Hörgrenze ist die Unterschiedsempfindlichkeit sehr gering. In den höchsten Oktaven werden Differenzen, die Tausende von Schwingungen betragen, verkannt. Übrigens spielen Übung und musikalische Begabung hierbei eine große Rolle. So fand Stumpf Unmusikalische, die um eine Terz (und mehr) verschiedene Tonhöhen miteinander verwechselten.

Gehen wir von irgend einer Tonhöhe, etwa von 500 Schwingungen, aus und nehmen als den für diese Region durchschnittlich eben wahrnehmbaren Höhenunterschied, als sogenannte Unterschiedsschwelle, 0,4 Schwingungen an, so ist der nächste eben höhere Ton 500,4; dann folgt 500,8 u. s. w. Auf diese Weise bekommen wir allein zwischen 500 und 1000 Schwingungen über 1200 unterscheidbare Töne, und würden wir das Verfahren einerseits über 1000 hinaus bis zur oberen Hörgrenze, andererseits von 500 abwärts bis zum tiefsten Tone fortsetzen, so würden wir die gesamte physiologische Tonreihe erhalten, bezogen auf den Ausgangston 500. Hätten wir an dessen Stelle einen anderen gewählt, so hätte sich eine ebensolche Reihe, nur mit anderen Schwingungszahlen, ergeben.

Wie die physiologische Tonreihe gewissermaßen nur einen Ausschnitt aus der physikalischen darstellt,

Digitized by Google

so ist sie ihrerseits wiederum sehr viel umfangreicher als die musikalische. Die höchsten und tiefsten Töne werden musikalisch überhaupt nicht verwertet und von den übrigen nur solche, deren Schwingungszahlen in gewissen besonderen Verhältnissen zu einander stehen. Da es eben nur auf die Verhältnisse ankommt, so bedürfen wir zur Konstruktion der musikalischen Tonreihe eines bestimmten, an sich beliebigen Ausgangstones, auf den wir alle übrigen beziehen können.

Als Ausgangspunkt für die Stimmung der Orgeln nahm man im 16. bis 17. Jahrhundert einen verhältnismäßig hohen Ton. Später ging die Stimmung herunter, namentlich als sich außerhalb der Kirche die Kammermusik entwickelte und ihre eigene Normaltonhöhe bekam, die als Kammerton von dem Chortone, dem Stimmtone der Orgeln, unterschieden wurde. In der Folgezeit gebrauchte man dann allgemein den Kammerton (das a der eingestrichenen Oktave), doch war dessen Höhe vielfachen Schwankungen unterworfen. Nach der Pariser Stimmung von 1788 hatte das eingestrichene a 409 Schwingungen, nach der älteren Mozart-Stimmung hatte es ca. 421 und 442 nach der Wiener und Berliner Stimmung von etwa 1850. Im Jahre 1858 bestimmte die Pariser Kommission einen neuen Kammerton (diapason normal) zu 870 v. s., also 435 Schwingungen nach deutscher Zählung, der 1885 auch von der Wiener Konferenz angenommen wurde und seitdem eine weite, aber nicht allgemeine Verbreitung gefunden hat (z. B. nicht in England).

Zum Zwecke einer vorläufigen orientierenden Übersicht über den Aufbau der musikalischen Tonreihe wollen wir jedoch nicht vom Kammertone ausgehen, sondern die sogenannte diatonische C-dur-Tonleiter betrachten, also als Ausgangspunkt jenen Ton wählen, dem, wenn

Digitized by Google

der Kammerton die Höhe 435 hat, die Schwingungszahl 130,5 zukommt und der im musikalischen Sprachgebrauche das kleine oder ungestrichene c (c^0) heißt. Steigen wir von diesem c als der ersten Stufe (**Prime**) aus die C-dur-Tonleiter aufwärts, so treffen wir als nächste Stufe (**Sekunde**) den Ton von $146\frac{13}{16}$ Schwingungen, d genannt. Dann folgen: die (große) **Terz** e mit $163\frac{1}{8}$ Schwingungen, die **Quarte** f mit 174 Schwingungen, die **Quinte** g mit $195\frac{3}{4}$, die (große) **Sexte** a mit $217\frac{1}{2}$, die (große) **Septime** h mit $244\frac{11}{16}$ Schwingungen und endlich die **Oktave** c′ (oder $\bar{c}$) mit 261 Schwingungen. Die Schwingungszahlen der Töne c und d stehen in einem einfachen Verhältnisse zu einander; sie verhalten sich nämlich wie 8 : 9. Es ist mithin:

$$d = \frac{9}{8} \cdot c.$$

Ebenso ergibt sich:

$$e = \frac{5}{4} \cdot c;$$

$$f = \frac{4}{3} \cdot c;$$

$$g = \frac{3}{2} \cdot c;$$

$$a = \frac{5}{3} \cdot c;$$

$$h = \frac{15}{8} \cdot c;$$

$$c' = 2 \cdot c.$$

Wir bekommen also für die **diatonische** C-dur-**Tonleiter** nachstehende Reihe:

Digitized by Google

c	d	e	f	g	a	h	$\bar{c}$
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
1,000	1,125	1,250	1,333	1,500	1,667	1,875	2,000.

Gehen wir in derselben von g aus um einen Quartenschritt aufwärts nach $\bar{c}$, so erweist sich das Intervall g—$\bar{c}$ als ebenso groß wie c—f. Gehen wir dagegen von a um eine Terz aufwärts nach $\bar{c}$, so ist dieser Schritt eine sogenannte kleine Terz, denn das Verhältnis $\bar{c}$: a ist

$$\frac{6}{5} = 1{,}20,$$

während das der großen Terz e : c oder h : g gleich

$$\frac{5}{4} = 1{,}25$$

ist. Das Intervall e—$\bar{c}$ ist eine kleine Sexte, denn $\bar{c}$: e ist gleich $\frac{8}{5}$ oder 1,60, während der Quotient der großen Sexte gleich $1{,}\bar{6}\ldots$ ist. Große Sexte und kleine Terz, große Terz und kleine Sexte, Quinte und Quarte ergänzen einander zur Oktave; man sagt in solchen Fällen, das eine Intervall sei die Umkehrung des anderen. Das Intervall

$$\frac{9}{8} = 1{,}125$$

der Sekundenschritte c—d, f—g und a—h wird als großer Ganzton bezeichnet, das Intervall

$$\frac{10}{9} = 1{,}\bar{1}\ldots$$

Digitized by Google

der Sekunden d—e und g—a als **kleiner Ganzton**. e—f und h—$\bar{c}$ sind (große) **Halbtöne**, deren Intervall

$$\frac{16}{15} = 1{,}0\bar{6}\ldots.$$

beträgt.

Will man die diatonische Dur-Tonleiter nicht von c sondern von einem anderen Tone, z. B. d, aus bilden, so ergibt sich als große Terz von d, indem man die Schwingungszahl von d mit $\frac{5}{4}$ multipliziert, ein Ton, der höher als das f, aber tiefer als das g der eben erörterten C-dur-Tonleiter ist. Man nennt diesen Ton fis. Analog braucht man als große Terz zu e einen Ton gis und für andere Fälle auch noch die Töne cis, dis und ais. Geht man andererseits um eine große Terz vom g der C-dur-Tonleiter abwärts, so kommt man um einen Halbton über e hinaus zu einem Tone es, dem als Resultat ähnlicher Bildungen die Töne des, fes, ges, as und b (zu h gehörig) entsprechen. Die Tonreihen mit Halbtonstufen c, cis, d, dis, e, f, fis, g, gis, a, ais, h einerseits und c, des, d, es, e, f, ges, g, as, a, b, h nennt man **chromatische Leitern**. In der **temperierten** Stimmung unserer Klaviere sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Halbtonstufen ausgeglichen und fallen die Töne cis und des, dis und es u. s. w. zusammen.

Auf die Tongruppe c bis $\bar{c}$, welche die kleine oder ungestrichene Oktave heißt, folgt nach oben die eingestrichene Oktave $\bar{c}$ bis $\bar{\bar{c}}$. Ihre Struktur ist genau dieselbe wie die der kleinen: $\bar{d} = 2 \cdot d$ ist also die Oktave von d, $\bar{e}$ die Oktave von e u. s. w. So reiht sich weiter aufwärts und desgleichen von c^0 abwärts eine Oktave an die andere. Die ganze Tonreihe, in C-dur dargestellt, besteht aus der folgenden Oktavenkette:

Digitized by Google

Subkontra-Oktave	C_2	bis	C_1;	$16\frac{5}{16}$	bis	$32\frac{5}{8}$ Schwingungen,
Kontra- „	C_1	„	C;	$32\frac{5}{8}$	„	$65\frac{1}{4}$ „
Große „	C	„	c;	$65\frac{1}{4}$	„	$130\frac{1}{2}$ „
Kleine „	c	„	c^1;	$130\frac{1}{2}$	„	261 „
Eingestrichene Oktave	c^1	„	c^2;	261	„	522 „
Zweigestrichene „	c^2	„	c^3;	522	„	1044 „
Dreigestrichene „	c^3	„	c^4;	1044	„	2088 „
Viergestrichene „	c^4	„	c^5;	2088	„	4176 „
Fünfgestrichene „	c^5	„	c^6;	4176	„	8352 „
Sechsgestrichene „	c^6	„	c^7;	8352	„	16704 „
Siebengestrichene „	c^7	„	c^8;	16704	„	33408 „

Nach dieser Tabelle kann man zugleich leicht ermessen, wie völlig belanglos für die Beurteilung eines Intervalles durch das Ohr der absolute Unterschied der Tonhöhen, die arithmetische Differenz, ist. Die Tonhöhen C und c sind nur um $65\frac{1}{4}$ Schwingungen verschieden, dagegen c^3 und c^4 um 1044. Trotzdem ist für unser Ohr das Intervall in beiden Fällen das gleiche, da beidemale die Tonhöhen sich verhalten wie 1 : 2.

Digitized by Google

Während man Personen, welche über ein absolutes Tongehör verfügen und mit dessen Hilfe imstande sind, zu erkennen, ob ein ihnen vorgespielter Ton ein c, a oder was sonst immer ist, oder umgekehrt irgend eine verlangte Note unmittelbar zu intonieren, nicht allzu häufig findet, ist das relative Tongehör, die Fähigkeit, das musikalische Intervall zweier Töne richtig zu beurteilen, weit verbreitet und jedem Musikalischen eigen. Über die Schärfe des Intervallurteils sind schon von älteren Autoren Untersuchungen angestellt, haben aber zu vielfach divergierenden und nicht durchweg einwandfreien Resultaten geführt. Umfangreiche neuere Beobachtungen Stumpfs und seiner Versuchspersonen ergaben folgendes. Bei der kleinen Terz mit zeitlicher Aufeinanderfolge der beiden Töne wird von musikalisch Geübten der reinen Stimmung eine Verkleinerung des Intervalles vorgezogen, welche für die mittlere Tonlage beiläufig $1\frac{1}{2}$ Schwingungen beträgt, bei der großen Terz umgekehrt eine für die mittlere Tonlage auf etwa eine Schwingung zu schätzende Vergrößerung. Von der Terz zur Quinte und von der Quinte zur Oktave wächst die Neigung zur Vergrößerung des Intervalles. Eine analoge Neigung zur Vergrößerung der Intervalle findet sich auch bei Gleichzeitigkeit der Töne, doch werden die Intervalle gleichzeitiger Töne viel schlechter beurteilt als solche, deren Töne nacheinander angegeben werden. Alle diese Versuche beziehen sich auf die mittleren Oktaven der musikalischen Tonreihe. In der Nähe der unteren und oberen Hörgrenze ist das Intervallurteil ähnlich der Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen außerordentlich mangelhaft. Ins einzelne gehende und abschließende Beobachtungen hierüber stehen aber noch aus.

Digitized by Google

Weitere physiologische und psychologische Eigenschaften einfacher Töne.

Bei der Bedeutungslosigkeit der tiefsten und höchsten Töne für die Musik hat auch die Feststellung der Hörgrenzen hauptsächlich ein physiologisches Interesse. Sie ist übrigens ein noch keineswegs völlig gelöstes Problem, ganz abgesehen davon, daß die Hörgrenzen je nach der Hörschärfe, Aufmerksamkeit und Übung des Beobachters und der Art des benutzten Instrumentes Schwankungen unterliegen. Die Schwingungszahl des tiefsten Tones ist etwa gleich 16 zu setzen, während die obere Hörgrenze je nach den Umständen in die sieben- oder achtgestrichene Oktave fällt.

Hiernach bringt ein Körper, der vielleicht 3 Pendelschwingungen in der Sekunde macht, oder ein anderer, der in der gleichen Zeit 90000 vollführt, zwar einen physikalischen Ton hervor, jedoch keinen hörbaren. Aber auch physikalische Töne von mittlerer Höhe werden nur dann wahrgenommen, wenn sie nicht zu leise und nicht von zu kurzer Dauer sind. Einige Forscher haben gefunden, daß 2 Schwingungen eines Tones zur Erkennung seiner Höhe genügten, andere fanden 4—5, ja 20 und mehr dazu nötig. Dies steht damit in Beziehung, daß jeder Tonempfindung ein gewisses Anklingen und Abklingen zukommt.

Untersuchungen von Helmholtz und anderen Autoren haben ergeben, daß höhere Töne auch bei gleicher Amplitude lauter klingen als tiefere. Es kommt ihnen daher offenbar eine größere physiologische Stärke zu. Hiermit mag es zusammenhängen, daß das Anhören der höchsten Töne für manche mit äußerst unangenehmen Sensationen

Digitized by Google

verknüpft ist. Preyer berichtet gelegentlich darüber, daß sehr hohe Stimmgabeln, in der Nähe des Kopfes stark angestrichen, ein Gefühl hervorriefen, „wie wenn in das Ohr mit einer sehr feinen Nadel gestochen würde.“ Eine seiner Versuchspersonen hatte die Empfindung, als zöge man ihr beiderseits einen Bindfaden durch die Wangen am Unterkiefer entlang von den Ohren zum Kinn. Preyer selbst schienen beim kräftigen Erklingen der höchsten Gabeln die Trommelfelle nach innen gezogen zu werden; auch traten bei ihm Schmerzen in den Ohren und eigentümliche Hautgefühle im Rücken auf. Doch ist, wie gesagt, große Stärke der Töne zur Erzeugung so heftiger Nebenempfindungen notwendig. Bei den schwächeren höchsten Tönen der älteren Galtonpfeifen treten sie nur selten auf.

Immer aber wird angegeben, daß die höchsten Töne einen eigentümlich spitzigen, winzigen Eindruck machen. Hierbei mögen wohl die Empfindung begleitende Raumvorstellungen und sonstige Erfahrungen mitspielen, wie die, daß die höchsten Töne von den kürzesten Saiten, Pfeifen oder Stimmgabeln erzeugt werden und daß die kleinsten Tiere im allgemeinen die höchsten Stimmen haben. Doch kommt auch abgesehen von solchen sekundären Einflüssen der Tonempfindung an sich, und zwar durch die ganze Tonreihe hindurch, als immanente Eigenschaft ein gewisses räumliches Moment, eine Tongröße, zu. Wie die hohen Töne stechend oder dünn erscheinen, so werden die tiefen für massig, schwer, den Hörer ringsumflutend erklärt; selbst unbefangene Kinder bezeichnen die hohen Töne als „klein“ und die tiefen als „groß“. Die Tongröße ist an den Grenzen des Tonreiches besonders deutlich und verändert sich im übrigen kontinuierlich mit der Höhe. Der räumliche

Digitized by Google

Gegensatz zwischen tiefen und hohen Tönen ist jedoch nicht der einzige, der neben dem Höhenunterschiede selbst zur Geltung kommt. Tiefe Töne besitzen, wie eben erwähnt wurde, bei gleicher physikalischer Stärke eine geringere Empfindungsintensität als hohe. Je weiter man in der Tonreihe aufsteigt, desto schärfer und durchdringender werden die Töne. Deswegen gebrauchten die Griechen für die hohen Töne den Ausdruck scharf (ὀξύ), während sie die tiefen als schwer (βαρύ) bezeichneten, und auch im Sanskrit und im Hebräischen ist hoher Ton soviel wie lauter Ton. Tiefe Töne erscheinen uns weich und milde; wir nennen sie dumpf, wenn wir ihre Schwäche und Tiefe zugleich kennzeichnen wollen. Sehr hohen Tönen, die mit großer Kraft unser Ohr treffen, geben wir das Beiwort schrill, gellend; ihr Prädikat „durchdringend" dürfte sich darauf beziehen, daß sie häufig unwillkürliche Kontraktionen der Binnenmuskeln des Ohres und Mitempfindungen in einzelnen Tastnerven hervorrufen. Die gelegentlich infolge innerer Reizungen des Gehörnerven subjektiv im Ohre erklingenden Töne können ebenfalls sehr hoch sein, sind jedoch meist leise. Wir nennen sie dann aber auch nicht schrill sondern dünn. Bei Vielen ist ferner die Wahrnehmung der tiefen Töne mit der Vorstellung von etwas Dunklem verknüpft, während die hohen als hell bezeichnet werden. Hier handelt es sich um einen Gegensatz, der wie hoch und tief sich unmittelbar auf den Unterschied der Tonqualitäten bezieht. Wie wir uns das Tonreich als eine Reihe vorstellen, in der man Schritt für Schritt vom tiefsten zum höchsten Ton fortschreitet, so könnte man eine ebensolche Reihe vom dunkelsten (dumpfsten) zum hellsten bilden. Die verschiedenen Benennungen, die wir, ähnlich wie man von einem beißendem Geschmacke, einem

Digitized by Google

trockenen Weine oder einer kalten Farbe spricht, dem Gebiete der Taſt-, Raum- und Farbenwahrnehmung entnehmen, um den Eindruck eines Tones näher zu charakterisieren, hat Stumpf unter dem Kollektivbegriff Tonfarbe zusammengefaßt und drei verschiedene Skalen unterschieden: (tief) dunkel — (hoch) hell; weich, mild — schrill, durchdringend; schwer, groß — spitz, dünn, entsprechend den mit der Höhe, Stärke und Größe des Tones parallel gehenden Veränderungen der Färbung.

Die Klänge.

Wenn zwei, drei oder mehr Töne zugleich erklingen, erhalten wir einen Zweiklang, Dreiklang oder Vielklang, und wie wir im vorigen Kapitel die für die Musik wichtigsten physikalischen, physiologischen und psychologischen Eigenschaften der Töne erörtert haben, so wollen wir jetzt die Klänge einer analogen Betrachtung unterziehen. Spricht man von einem Klange, so wird im allgemeinen dabei angenommen, daß die ihn zusammensetzenden Töne, seine Teiltöne, von verschiedener Höhe sind. Denn wenn wir einen Einklang herstellen, indem wir mehrere Stimmgabeln, die genau gleich hoch (unison) sind, gleichzeitig in Gang setzen, so ist der Gehörseindruck kein anderer, als wenn wir den entsprechend verstärkten Ton einer einzigen von den Gabeln wahrnehmen, und in Übereinstimmung hiermit unterscheidet sich physikalisch die Klangwelle eines solchen Einklanges nur durch die größere Amplitude von der Pendelwelle des einfachen Tones.

Digitized by Google

Entstehung und Darstellung der Klangwelle.

Wie die Physik lehrt, ist die Gesamtwirkung, welche zwei Kräfte auf einen Massenpunkt oder Körper ausüben, gleich der Summe der Einzelwirkungen, wenn beide Kräfte in derselben Richtung, dagegen gleich der Differenz der Einzelwirkungen, wenn beide Kräfte in entgegengesetzter Richtung wirken. Dabei ist es gleichgültig, ob die Kräfte zugleich oder nacheinander tätig sind. Sind mehr als zwei Kräfte vorhanden, so setzt man zum Zwecke der theoretischen Ermittelung des Totalergebnisses erst zwei Kräfte zu einer Resultierenden zusammen, dann diese mit der dritten Kraft und so fort. Diese Sätze finden auch Anwendung bei der Vereinigung mehrerer Wellenbewegungen zu einer Resultierenden. Werfen wir zwei Steine gleichzeitig an verschiedenen Stellen ins Wasser, so entsteht an jeder dieser Stellen ein Wellenring, die Wellenringe breiten sich aus und stoßen endlich aufeinander. Sie hindern sich bei diesem Zusammentreffen, das man als Interferenz bezeichnet, gegenseitig nicht in ihrer weiteren Fortpflanzung; aber dort, wo zwei Wellenberge sich begegnen, gibt es einen Berg, dessen Höhe gleich der Summe der einzelnen Höhen ist, und wo zwei Täler sich vereinigen, erscheint ein Tal von entsprechend größerer Tiefe, während wiederum ein Berg und ein Tal, wenn sie sich kreuzen, einander ganz oder teilweise aufheben. Ganz ebenso summieren sich algebraisch die Verdichtungen und Verdünnungen mehrerer longitudinaler Wellen, die sich zugleich in einer und derselben Punktreihe fortpflanzen. In Figur 5 stellt die gestrichelte Sinuskurve eine Schwingung eines Tones dar; die punktierte Linie

Digitized by Google

entspricht einem Tone von der doppelten Anzahl Schwingungen, also der Oktave, und die ausgezogene Kurve ist die Klangwelle des aus diesen beiden Tönen (Grundton und erstem Oberton [Oktave]) resultierenden Zweiklanges. Die sehr einfache Art ihrer Konstruktion bedarf nach den

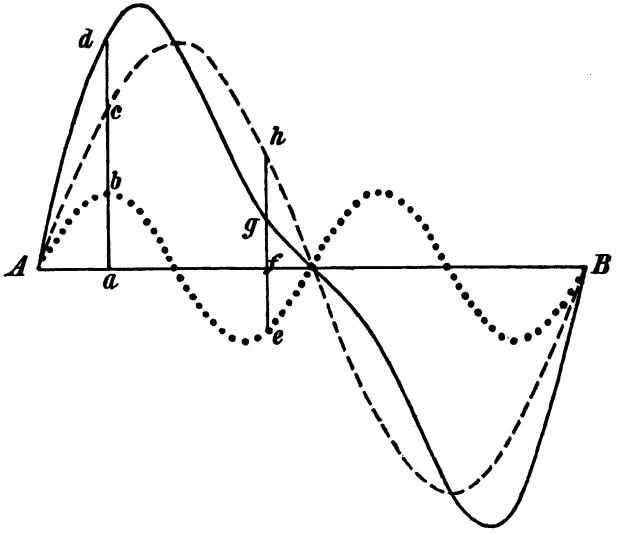


Fig. 5. Klangkurve (Grundton und Oktave); Phasengleichheit.

vorstehenden Bemerkungen wohl kaum noch der besonderen Erläuterung: die Höhe jedes Punktes der Klangkurve über AB ist gleich der Summe oder Differenz der entsprechenden Höhen der beiden anderen Kurven, z. B. $ad = ab + ac$ oder $fg = fh - fe$. Da so gewisser-

Digitized by Google

maßen eine Kurve auf die andere aufgesetzt wird, spricht man auch von einer Superposition der Tonwellen.

In Figur 5 fallen die Anfangs- und Endpunkte der beiden Tonwellen aufeinander; es besteht Phasengleichheit. Das bedeutet, ins Praktische übersetzt, daß

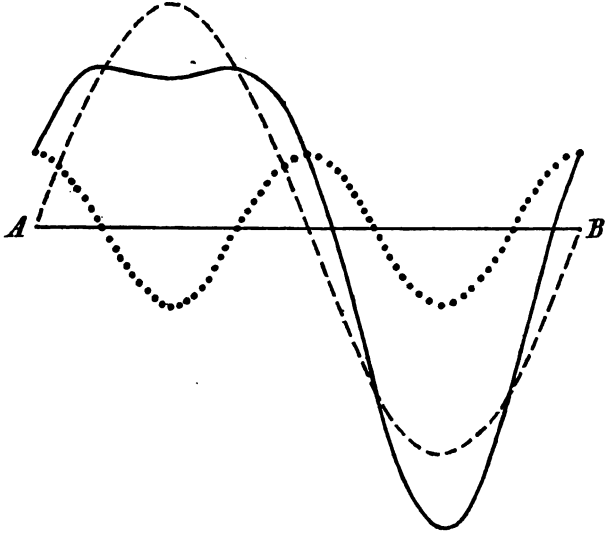


Fig. 6. Klangkurve (Grundton und Oktave); Phasenverschiebung.

die Töne genau zur gleichen Zeit begonnen haben. Wir können aber auch ebensogut annehmen, die Schwingung des einen Tones fange erst an, nachdem der andere bereits einen Teil, etwa ein Viertel, der seinigen vollendet hat. Die Klangkurve erhält dann eine andere Form.

Digitized by Google

Figur 6 zeigt eine Zusammensetzung der nämlichen Töne wie Figur 5, aber mit einer Phasenverschiebung des höheren Tones, welche ein Viertel seiner Wellenlänge beträgt.

Hätten wir in den Figuren 5 und 6 AB kleiner oder größer genommen, so hätten wir eine entsprechend weniger oder mehr gestreckte, aber im übrigen nicht anders beschaffene Klangkurve erhalten. Die Klangwelle in den Figuren 5 und 6 ist ebenso lang wie die Welle des tieferen Tones. Die Anzahl der beim Anhören dieses Klanges in der Sekunde das Ohr treffenden Klangwellen (Klangperioden) ist gleich der Schwingungszahl des tieferen Tones.*) Für die Zeichnung genügt natürlich eine einzige, da sie alle einander absolut gleich sind. Kämen zu den beiden Teiltönen der Figuren 5 und 6 noch weitere hinzu, so würden wir das Verfahren der Superposition bis zur Gewinnung der Gesamtresultierenden fortzusetzen haben. Der Leser wird jedoch nach dem Angegebenen imstande sein, selbst Töne von beliebiger Anzahl, Höhe, Amplitude und Phasendifferenz zu Klängen graphisch zusammenzusetzen.

Wie man jederzeit aus irgend welchen Sinuskurven eine Klangkurve konstruieren kann, so läßt sich umgekehrt auch jede auf dem Papiere gegebene Klangwelle wieder in ihre pendelförmigen Komponenten zerlegen. Die Methode, nach der eine solche Zerlegung ausgeführt werden kann, ist von dem berühmten Mathematiker

*) Anmerkung: Hätten wir in Figur 5 statt des Schwingungszahlenverhältnisses 2 : 1 die Teiltöne so gewählt, daß n Wellen des höheren Tones auf m Wellen des tieferen entfallen wären, so würden wir eine Länge der Klangperiode gleich m Wellen des tieferen Tones bekommen haben.

Digitized by Google

Fourier angegeben, der zugleich gezeigt hat, daß eine jede Klangkurve sich immer nur auf eine einzige Weise und auf keine andere in einfache Sinusschwingungen auflösen läßt. Wir wollen indessen hier nicht näher auf die Fouriersche Analyse eingehen; sie erlaubt keine elementar-mathematische Darstellung und ist auch für unseren Gegenstand nebensächlich. Viel wichtiger ist die Tatsache, daß Klänge sich nicht bloß nach mathematischer Berechnung, sondern auch experimentell-physikalisch in ihre Teiltöne zerlegen lassen und zwar mit Hilfe eines Vorganges, welcher unter dem Namen Resonanz bekannt ist.

Die Resonanz.

Zu Beobachtungen über das Wesen der Resonanz oder des Mitschwingens bedient man sich am besten der Stimmgabeln. Stellt man zwei solche, die auf Resonanzkasten stehen und auf genau dieselbe Schwingungszahl abgestimmt sind, in einiger Entfernung voneinander auf, schlägt eine davon kräftig an und bringt sie einen Augenblick darauf wieder zum Schweigen, so gibt die zweite, von den durch die Luft auf sie übertragenen Tonwellen der ersten erregt, den Ton wieder, sie resoniert. Eine notwendige Bedingung für das Gelingen des Versuches ist die genaue Übereinstimmung der Gabeln hinsichtlich der Tonhöhe. Wie dann das Mittönen zustande kommt, hat Helmholtz anschaulich gemacht, indem er auf die Art hinwies, wie große Kirchenglocken geläutet werden. Der erste Zug am Glockenseile setzt eine schwere Glocke kaum merklich in Bewegung; wird aber in taktmäßiger Aufeinanderfolge jedesmal dann gezogen, wenn der Hebel der Glocke mit dem Seile sich bei seinem Hin- und Herschwingen gerade in der abwärts gerichteten

Digitized by Google

Phase befindet, so summieren sich die einzelnen Züge und die Bewegungen des Hebels nebst der Glocke werden von Mal zu Mal ausgiebiger. Dieser Erfolg kann nur dann eintreten, wenn die Zugkraft periodisch wirkt und diese Periode genau mit der Periode der Eigenschwingungen der Glocke übereinstimmt. Die Analogie zwischen dem rhythmischen Ziehen an dem Glockenseile und den rhythmisch einander folgenden Impulsen, welche die von einer Gabel ausgehenden Luftverdichtungen und -verdünnungen einer zweiten Gabel von gleicher Schwingungszahl erteilen, liegt auf der Hand. Zieht man in zu langen oder zu kurzen Pausen an der Glocke, so wird zuweilen der Hebel gerade dann von den Zügen nach unten betroffen werden, wenn seine eigene Bewegung aufwärts gerichtet ist. Ein solches Verfahren muß die Schwingungen der Glocke stören oder vernichten, und desgleichen kann man eine Stimmgabel nicht durch eine andere zum Mittönen bringen, die wesentlich schneller oder langsamer schwingt. Verstimmt man die eine der unisonen Gabeln durch Aufkleben von etwas Wachs, so daß sie vielleicht zwei Schwingungen weniger macht als die zweite, so kommt diese bereits kaum mehr zum Tönen. Anders verhält sich ein Körper, der eine ihm eben erteilte Bewegung rasch wieder verliert; er ist im nächsten Augenblicke bereit, eine Bewegung von irgend einer anderen Art aufzunehmen und vermag daher auf verschiedene Töne zu resonieren. Hierher gehören vor allem gewisse Membranen, auch das Trommelfell des Ohres, die nicht gleich den Stimmgabeln nach der Erregung langsam in ihrem Eigentone ausklingen, sondern jeden Stoß nur mit einem minimalen Nachschwingen beantworten und daher durch jede Art von Schwingungen erregbar sind. Je mehr ein Körper zu Nachschwingungen in Form eines

Digitized by Google

Eigentones befähigt ist, um so kräftiger ist seine Resonanz, aber auch um so beschränkter deren Umfang. Die Resonanz starrer elastischer Körper wird in der Musik benutzt, um an sich schwachen Tönen eine größere Stärke zu verleihen. Eine Saite, die einfach in einen Schraubstock gespannt ist, oder eine in die Luft gehaltene Stimmgabel geben nur einen leisen Ton. Deswegen sind bei der Geige, der Zither, dem Monochord, dem Klavier die Saiten über einem Resonanzboden angebracht, der so eingerichtet ist, daß er alle Saitentöne möglichst gleichmäßig verstärkt. Die Saiten selbst mit ihrer geringen Fläche setzen nur wenige Luftteilchen in Bewegung, die den Schall verbreiten können; wird dagegen die größere Fläche des Resonanzbodens zum Mitschwingen gebracht, so werden durch diese Vermittelung die Töne auf eine beträchtlichere Luftmasse übertragen. Freilich muß nach dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft der Ton, was er an Intensität gewinnt, an Dauer verlieren.

Um eine Stimmgabel von mittlerer Tonhöhe zu verstärken, genügt es, sie fest auf eine Tischplatte zu setzen. Meist aber befestigt man die Gabeln auf besonderen Resonanzkasten, Holzkasten von rechteckigem Querschnitte, die an der einen Seite oder an zwei gegenüber liegenden offen sind. Man macht hierbei von der Tatsache Gebrauch, daß die Luft in Hohlräumen mit einer oder zwei Öffnungen kräftig zum Mitschwingen gebracht wird, wenn ein Ton in der Nähe erklingt, dessen Schwingungszahl zu den Maßen des Hohlkörpers in einem bestimmten (später genauer zu erörternden) Verhältnisse steht. Je tiefer der zu verstärkende Ton ist, um so größer muß der Resonanzraum sein. Preyer ließ für eine Stimmgabel, welche ca. 14 Schwingungen in der Sekunde machte, einen Resonanzkasten von mehr

Digitized by Google

als 6 m Länge anfertigen. Andererseits kann man nur Töne bis etwa zur fünfgestrichenen Oktave hinauf durch Resonanzapparate verstärken, da letztere alsdann wegen der Kleinheit ihrer Dimensionen versagen. Auf das Material, aus dem der Resonanzkörper besteht, kommt es hierbei nicht wesentlich an. Man nehme etwa eine beliebige Flasche und stelle zunächst ihren Eigenton fest, den man dadurch zu Gehör bringt, daß man mit dem Munde einen Luftstrom über die Öffnung hinweg bläst; dann wähle man aus einer Anzahl Stimmgabeln diejenige aus, deren Höhe mit dem Flaschentone übereinstimmt, schlage sie an und halte sie über die Mündung der Flasche: der an sich leise Ton der Gabel wird hierdurch viele Meter weit hörbar. Die übrigen Gabeln werden kaum oder gar nicht verstärkt. Die Flasche läßt sich aber, indem man das Volumen der in ihr enthaltenen Luft durch Eingießen von Wasser verringert, allmählich auf immer höhere Töne abstimmen, bis die Grenze ihrer Resonanzfähigkeit erreicht ist. Sprengt man den Boden einer Flasche ab und überzieht sie an dessen Stelle mit einer dünnen Membran, so kann man auch die Resonanzschwingungen durch Sand, der auf die Membran gestreut wird, sichtbar machen. Ähnlich wie bei den bekannten Chladnischen Klangfiguren ordnet sich nämlich der Sand, sobald der Apparat durch einen Ton angesprochen wird, zu einer geometrischen Figur. Als noch weit empfindlicher erweisen sich aber die von Helmholtz in die Akustik eingeführten Resonatoren. Es sind das gläserne oder metallene Hohlkugeln oder Röhren (Fig. 7), deren eine Öffnung (a) einen scharf geschnittenen Rand hat, während die andere (b) zur Einführung in das Ohr des Beobachters bestimmt ist. Jeder solche Resonator besitzt eine Reihe von Eigentönen, von denen der tiefste am

Digitized by Google

leichteſten und kräftigſten mit einem in ſeiner Nähe erzeugten gleich hohen Tone mitklingt. Er kommt praktiſch allein in Betracht, und nach ihm wird die Tonhöhe des Reſonators bezeichnet. Verſtopft man das eine Ohr und ſetzt an das andere einen Helmholtzſchen Reſonator, ſo

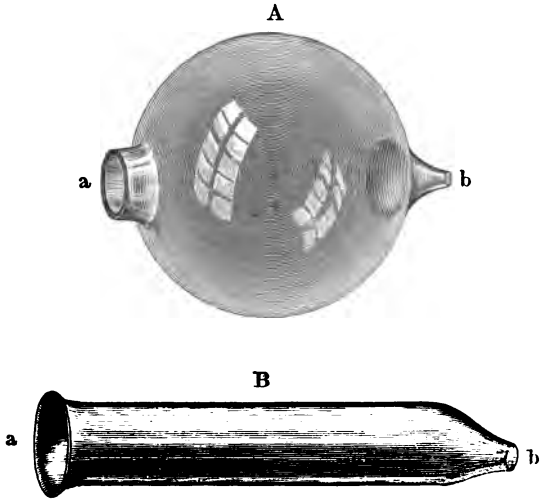


Fig. 7. Reſonatoren.

hört man die meiſten Töne, die in der Umgebung erzeugt werden, viel gedämpfter als ſonſt. Sobald aber der Ton, auf den der Reſonator abgeſtimmt iſt, angegeben wird, dringt dieſer mit gewaltiger Stärke ins Ohr. Um alſo zu entſcheiden, ob ein beſtimmter Ton in einer Klangmaſſe enthalten iſt oder nicht, braucht man nur den betreffenden Reſonator ins Ohr zu ſtecken, dann

Digitized by Google

wird auch ein ganz ungeübtes, ja harthöriges Ohr den fraglichen Ton, falls er überhaupt vorhanden ist, aus dem Klange fast gellend heraushören.

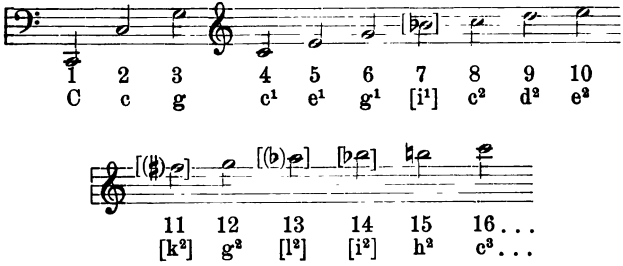
Klanganalyse und Klangfarbe.

Hat man eine genügende Anzahl von Resonatoren zur Verfügung — es sind übrigens auch Resonanzröhren verfertigt worden, die sich durch Ausziehen beziehungsweise Zusammenschieben auf verschiedene Tonhöhen nacheinander einstellen lassen — so kann man damit successive sämtliche Teiltöne, soweit sie im Bereiche der Resonanzfähigkeit liegen, aus einem Klange heraushören. Die Resonatoren sind also ein ausgezeichnetes Mittel zur physikalischen Zerlegung eines Klanges in seine Teiltöne, und die Akustik verdankt den verschiedenen Beobachtungen, die Helmholtz und andere mit Hilfe der Resonatoren angestellt haben, wesentliche Fortschritte.

Unter anderem kann man sich mittelst der Resonatoren leicht davon überzeugen, daß das, was man im täglichen Leben als einen „Ton" zu bezeichnen pflegt und was auch der Musiker so nennt, in Wahrheit so gut wie nie ein einfacher Ton oder, physikalisch gesprochen, eine Sinuswelle ist, sondern vielmehr ein Klang, eine Summe einfacher Töne. Wenn man, um irgend ein Beispiel zu wählen, am Harmonium die Taste für den Ton c niederdrückt und währenddessen nacheinander verschiedene Resonatoren benutzt, so ergibt sich, daß die betreffende Zunge des Instrumentes eine ganze Anzahl von einfachen Tönen gleichzeitig hören läßt. Der tiefste und stärkste Teilton ist der Ton c; er wird deswegen, zumal er ja auch zur Angabe der Tonhöhe des Ganzen dient, als der Grundton bezeichnet. Die

Digitized by Google

übrigen Töne sind seine Obertöne. Insofern sie zu ihm in einem bestimmten Verhältnisse stehen, indem ihre Schwingungszahlen Vielfache von der Schwingungszahl des Grundtones sind, nennt man sie auch harmonische Obertöne. Die Stärke, Zahl und Reihenfolge der einen und denselben Grundton begleitenden Obertöne ist bei verschiedenen Instrumenten recht different. Wir wollen darum hier vorerst einen idealen Fall ins Auge fassen, wo ein Grundton nebst einer großen lückenlosen Reihe von harmonischen Obertönen erklingt, nämlich folgende Reihe:



Wir sehen, daß der erste Oberton oder zweite Partialton die Oktave des Grundtones ist. Der zweite Oberton oder dritte Teilton ist die Duodezime des Grundtones, also die Quinte des ersten Obertones. Der dritte und vierte Teilton stehen im Quartenverhältnis, die Töne 4 und 5 bilden eine große Terz u. s. w. Überhaupt fallen alle Teiltöne in die fortlaufende C-dur-Tonleiter mit Ausnahme derjenigen, die den Primzahlen 7, 11, 13 u. s. w. und deren Vielfachen entsprechen. Diese Töne werden auch nur annähernd durch die in unserer Reihe für sie gegebenen Noten dargestellt, weshalb sie

Digitized by Google

in eine Klammer gesetzt sind. Das Verhältnis $7:4 = 1{,}75$ ist größer als die große Sexte und kleiner als die große Septime, man nennt es die natürliche Septime.

Eine größere Anzahl der Obertöne unserer Reihe würde man nun auch ohne physikalische Mittel allein mit Hilfe des Ohres aus dem Klange heraushören. Denn das Ohr besitzt schon an sich die Fähigkeit, einen Klang in seine Partialtöne zu zerlegen; eine Tatsache, deren fundamentale Bedeutung für die Praxis wie für die Theorie des Hörens Helmholtz, an die bahnbrechenden Forschungen G. S. Ohms anknüpfend, ins rechte Licht gestellt hat. Freilich gelingt es dem Ohre keineswegs immer, jeden Klang vollkommen zu analysieren, aber daran sind dann äußere Umstände schuld, wie ungenügende Stärke der Partialtöne, mangelnde Übung im Beobachten und dergleichen. Auch kommt in Betracht, daß man im allgemeinen die ungeradzahligen Partialtöne, also die Quinten, Terzen, Septimen, ganz bedeutend leichter unterscheidet als die Oktaven, was mit deren später noch zu besprechender Verschmelzung zusammenhängt; der zweite, vierte und achte Teilton sind aber Oktaven des Grundtones, der sechste und zwölfte solche der Duodezime. Zu Versuchen über die Wahrnehmung von Obertönen in einem Klange eignen sich besonders das Klavier und das Harmonium: man lasse zuerst ganz schwach diejenige Note erklingen, die man nachher aus dem Klange heraushören will, und halte ihre Tonhöhe mit der Aufmerksamkeit fest, dann wird man sie leichter auch im Klange bemerken. Schwieriger sind die Obertöne der meisten Blasinstrumente und namentlich die der menschlichen Stimme zu beobachten. Trotzdem wurden letztere bereits von Rameau konstatiert und zwar ohne physikalische Hilfsmittel.

Digitized by Google

Die Zungenpfeifen des Harmoniums haben besonders viele Obertöne, angeblasene Flaschen nur wenige. Der Klang weiter gedeckter Pfeifen, die schwach tönen, ist nach Helmholtz fast frei von Obertönen. Tonquellen jedoch, welche nur Grundtöne ohne jegliche Obertöne hervorbringen, gibt es nicht, sofern man von den tiefsten und schwersten Edelmannschen Stimmgabeln absieht, von denen wenigstens behauptet wird, daß sie reine Sinustöne lieferten. Eine gedeckte Orgelpfeife kann aus physikalischen Gründen nur die ungeradzahligen Teiltöne 1, 3, 5, 7 u. s. w. geben, während die offene gleich den schwingenden Saiten fähig ist, die ganze Reihe der natürlichen Obertöne bis zu einer gewissen Grenze hinauf zu produzieren. Da zu diesen mancherlei Unterschieden auch noch solche hinsichtlich der Intensität der Obertöne hinzukommen — in allen natürlichen Klängen nehmen die Teiltöne nach der Höhe hin an Stärke ab — so ergibt sich, daß ein und derselbe Grundton, auf verschiedenen Instrumenten angegeben, von recht verschiedenen Oberton-Kombinationen begleitet wird. Hierauf hat Helmholtz die Unterschiede der Klangfarbe zurückgeführt und nach seinen klassischen, in dem bekannten Buche: „Die Lehre von den Tonempfindungen" niedergelegten Untersuchungen wird jetzt von den maßgebenden Akustikern allgemein anerkannt, daß, wie die Höhe eines Tones von der Schwingungszahl und die Stärke von der Amplitude abhängt, so die Klangfarbe von der Form der Klangwelle, soweit diese durch die Zahl, Höhe und Schwingungsweite der Teiltöne bedingt ist. Unsere Figuren 5 und 6 haben gezeigt, daß die Gestalt der Klangkurve auch noch von dem Phasenverhältnis der Partialtöne wesentlich beeinflußt wird. Helmholtz hat jedoch durch besonders hierauf gerichtete

Digitized by Google

Versuche den Beweis erbracht, daß eine Phasenverschiebung den Charakter eines Klanges für das Ohr nicht ändert, was später von R. Koenig bestritten, aber von Hermann aufs neue und in eklatanter Weise bestätigt worden ist.

Es ist in der Regel viel leichter, aus einem Orchester einzelne Instrumente herauszuhören als aus einem Klange seine Teiltöne. In ersterem Falle kommen uns nämlich verschiedene Umstände zu Hilfe. So werden zwei Klangquellen unschwer unterschieden, wenn die eine das rechte, die andere das linke Ohr vorwiegend erregt; Instrumente, von denen das eine in Achteln, das andere in Vierteln geht, lassen sich wohl auseinander halten, zumal wenn sie nicht gleichzeitig einsetzen beziehungsweise aufhören, oder wenn das eine häufiger pausiert; auch die charakteristischen Nebengeräusche, das Blasen, Schlagen, Streichen, Kratzen spielen eine wichtige Rolle bei der Trennung mehrerer Einzelklänge im Ohre. Diese Anhaltspunkte fallen weg bei dem Heraushören der Teiltöne aus einem einzigen Klange. Aber es ist auch für die Wahrnehmung der Klangfarbe nicht nötig, daß man sich eines jeden Partialtones wirklich deutlich bewußt wird. Auch in dem nicht analysierten Eindrucke trägt doch jede Komponente für sich mit zur Beurteilung des Ganzen bei; denn eine Veränderung derselben bewirkt zugleich eine Veränderung der Klangfarbe.

Helmholtz hat zuerst in größerem Umfange die wichtigsten Instrumente hinsichtlich der Zusammensetzung ihrer Klänge aus Teiltönen untersucht und aus den Resultaten folgende bedeutungsvollen Regeln abgeleitet:

1. Töne, wie die der Stimmgabeln mit Resonanzröhren und der weiten gedackten Orgelpfeifen, klingen sehr weich und angenehm. Sie sind ohne alle Rauhigkeit, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf.

Digitized by Google

2. Klänge, welche von einer Reihe ihrer niederen Obertöne bis etwa zum sechsten hinauf in mäßiger Stärke begleitet werden, sind klangvoller, musikalischer. Sie haben, mit den einfachen Tönen verglichen, etwas Reicheres und Prächtigeres, sind aber vollkommen wohllautend und weich, so lange die höheren Obertöne fehlen. Hierher gehören die Klänge des Klavieres, der offenen Orgelpfeifen, die weicheren Pianotöne der menschlichen Stimme und des Horns, welche letzteren den Übergang zu den Klängen mit hohen Obertönen bilden, während die Flöten und schwach angeblasenen Flötenregister der Orgel sich den einfachen Tönen nähern.

3. Wenn nur die ungeradzahligen Teiltöne da sind, wie bei den engen gedackten Orgelpfeifen, den in der Mitte angeschlagenen Klaviersaiten und der Klarinette, so bekommt der Klang einen *hohlen*, oder bei einer größeren Zahl von Obertönen einen *näselnden* Charakter. Wenn der Grundton an Stärke überwiegt, ist der Klang *voll*, *leer* dagegen, wenn jener an Stärke den Obertönen nicht hinreichend überlegen ist. So ist der Klang weiter, offener Orgelpfeifen voller als der von engeren, der Klang der Saiten voller, wenn sie mit den Hämmern des Pianoforte angeschlagen werden, als wenn es mit einem Stöckchen geschieht oder wenn sie mit den Fingern gerissen werden, der Ton von Zungenpfeifen mit passendem Ansatze voller als von solchen ohne Ansatzrohr.

4. Wenn die höheren Obertöne jenseits des sechsten oder siebenten sehr deutlich sind, wird der Klang *scharf* und *rauh*. Der Grad der Schärfe kann verschieden sein; bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegenteil günstig für die Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von dieser Art sind besonders

Digitized by Google

wichtig die Klänge der Streichinstrumente, ferner die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Physharmonika und menschliche Stimme. Die rauheren, schmetternden Klänge der Blechinstrumente sind außerordentlich durchdringend und machen deshalb mehr den Eindruck großer Kraft als ähnliche Klänge von weicherer Klangfarbe. Sie sind deshalb für sich allein wenig geeignet zur künstlerischen Musik, aber von großer Wirkung im Orchester.

Stumpf hat die Helmholtzsche Lehre von der Klangfarbe nach der psychologischen Seite hin weitergeführt. Er scheidet zunächst unter dem zusammenfassenden Begriffe Klangcharakter alles das von der eigentlichen Klangfarbe ab, was durch bestimmte associierte Vorstellungen und Gefühle hineingetragen wird, die uns dazu veranlassen, einen Klang als edel, prächtig, melancholisch, schmelzend, idyllisch u. s. f. zu bezeichnen. Nach dieser Absonderung bleibt dann noch ein weiterer und ein engerer Begriff von Klangfarbe zu unterscheiden. Die Klangfarbe im weiteren Sinne umfaßt außer der Klangfarbe im engeren Sinne noch eine Reihe charakteristischer Merkmale der Instrumente, nämlich die eigentümliche Art und Dauer des An- und Ausklingens (die bei der Flöte anders ist als bei den schwerfällig einsetzenden Blechinstrumenten, beim Klaviere anders als bei der gestrichenen und bei der gezupften Violinsaite) die begleitenden Geräusche, die einigen Instrumenten speziell eigene Höhenlage, Stärkeunterschiede, Höhe- und Stärkeschwankungen und endlich gewisse melodische, rhythmische, auch wohl harmonische oder modulatorische Wendungen. Die Klangfarbe im engeren Sinne ist das, was Helmholtz die „musikalische Klangfarbe" genannt und als die Art der Zusammensetzung des Klanges aus Teiltönen definiert hat. Der tatsächliche Zusammenhang der

Digitized by Google

Klangfarbe mit den Obertönen ist außer allem Zweifel. Aber es bedarf noch der Erklärung, warum nun gerade die ungeradzahligen Teiltöne einen hohlen, näselnden Klang erzeugen. Warum wird ein Klang durch Obertöne kräftiger, reicher und besonders heller? Warum erscheint uns eine bestimmte Kombination von Teiltönen voll oder dick, eine andere dagegen leer? Diese Probleme und Schwierigkeiten hat Stumpf mit dem Hinweise darauf gelöst, daß die Klangfarbe im engeren Sinne die aus den Tonfarben resultierende Eigentümlichkeit der obertonhaltigen Klänge sei. Die Tonfarben bilden, wie wir sahen, eine mit der Tonhöhe von der dunkelsten zur hellsten fortschreitende Reihe, und dies macht es verständlich, daß ein Klang um so heller, schärfer werden muß, je mehr höhere Obertöne sich dem Grundtone beigesellen; gehören einige Obertöne den höchsten Regionen an und sind sie dabei stark, so wirken sie gellend, stechend und beeinflussen die Klangfarbe in diesem Sinne, während Klänge milde und weich genannt werden, wenn sie aus wenigen leisen Teiltönen der tieferen Regionen zusammengesetzt sind, denen wir auch einzeln das Prädikat weich oder milde beilegen. So läßt sich schließlich jede Klangfarbenqualität (im engeren Sinne) als eine Kombination der Tonfarbenqualitäten darstellen, gleichwie der Klang an sich eine Kombination seiner Teiltöne ist.

Das Ohr und die Helmholtzsche Theorie des Hörens.

Wenn man die Dämpfung eines Klavieres aufhebt, so daß alle Saiten frei schwingen können, und dann gegen den Resonanzboden einen Vokal auf irgend eine der Noten des Instrumentes mit kräftiger Stimme singt,

Digitized by Google

so gibt die Resonanz der nachklingenden Saiten deutlich den Vokal zurück. Der von dem Munde des Sängers ausgehende Klang wird von dem Saitensystem des Klavieres in seine Teiltöne zerlegt, indem jede Saite durch die ihrer Schwingungszahl entsprechende pendelförmige Komponente der Klangwelle in Mitschwingungen versetzt wird, und indem jede Saite ihren Ton wieder auf die umgebende Luft überträgt, entsteht aus der Kombination aller dieser Töne der Vokalklang im Klaviere aufs neue. Als einen analogen Vorgang faßt die berühmte Helmholtzsche Theorie das Hören eines Vokales oder irgend eines Klanges überhaupt auf. Ihr zufolge stellt die im inneren Ohre gelegene, sogleich genauer zu besprechende Basilarmembran ein System von Saiten dar, deren jede auf einen bestimmten Ton abgestimmt ist und in Mitschwingungen gerät, wenn dieser Ton das Ohr trifft; jede Saite steht mit einer Faser des Hörnerven in Verbindung, welche durch die Schwingungen gereizt wird und die Erregung ins Gehirn fortleitet, wo dann die Tonempfindung beziehungsweise die aus einzelnen Tonempfindungen sich zusammensetzende Klangwahrnehmung zustande kommt. Helmholtz führt also den physiologischen Prozeß der Klangzerlegung im Ohre auf die physikalische Erscheinung der Resonanz zurück, weshalb seine Theorie auch den Namen Resonanzhypothese trägt. Zu ihrem genaueren Verständnis sind einige anatomische Erörterungen unerläßlich.

Anatomie des Gehörorganes.

Man unterscheidet drei Teile des Ohres, das äußere, mittlere und innere, welche Figur 8 im schematischen Durchschnitte zeigt. D ist die äußere Öffnung des Gehörganges, welcher mit der Ohrmuschel zusammen das äußere Ohr bildet und durch das Trommelfell cc gegen das Mittelohr, die

Digitized by Google

durch die Eustachische Trompete oder Tube E mit dem Rachen kommunizierende, mit Luft erfüllte Paukenhöhle BB, abgeschlossen ist. Quer durch diese zieht die Kette der Gehörknöchelchen, Hammer, Amboß und Steigbügel, die miteinander in Gelenkverbindung stehen und von denen der Hammer dem Trommelfelle anliegt, während der Steigbügel mit seiner Fußplatte das sogenannte ovale Fenster o des inneren Ohres abschließt. Das innere Ohr oder Labyrinth A, das noch ein zweites in die Paukenhöhle schauendes, mit einer Membran verschlossenes Fenster r, das runde (auch Schneckenfenster, Fenestra

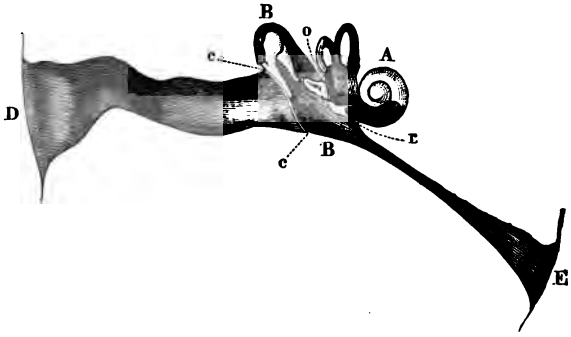


Fig. 8. Das menschliche Ohr.

cochleae) genannt, besitzt, besteht selbst wieder aus drei Teilen, nämlich den hinten gelegenen halbzirkelförmigen Bogengängen, dem Vorhofe, in dessen Wand der Steigbügel im ovalen Fenster beweglich befestigt ist, und der Schnecke. Letztere allein dient der Hörfunktion, während Vorhof und Bogengänge nach der jetzigen Anschauung der Physiologie Sinnesorgane enthalten, die für die Perception der Lage und der Bewegungen unseres Körpers bestimmt sind. Wir haben uns das Labyrinth als ein System von Hohlräumen vorzustellen, die miteinander in Verbindung stehen, vollständig mit Lymphe (Labyrinthwasser) erfüllt sind und in dieser Flüssigkeit suspendierte membranöse Gebilde enthalten. Wird das Labyrinth eines Knochenpräparates mit einem leicht schmelzbaren, bald wieder erstarrenden Metall gefüllt und

Digitized by Google

dann der umschließende Knochen durch geeignete Mittel beseitigt, so bekommt man einen Ausguß des Labyrinthes, der die Gestalt desselben genau wiedergibt. Figur 9 stellt eine Abbildung davon dar, nämlich ein linkes Labyrinth, von außen gesehen. Fo (Fenestra vestibuli) ist das ovale, Fec das runde Fenster; die nach vorn gelegene Schnecke ist ein um eine senkrecht zur Ebene des Papieres gerichtete Achse aufgewundener Kanal, welcher mit der in der Mitte sichtbaren Kuppel blind endet. Führen wir durch die Achse (Spindel, Modiolus) einer menschlichen Schnecke einen Längsschnitt, so erhalten wir eine Schnittfläche, wie sie Figur 10 in dreifacher Vergrößerung zeigt. Wir sehen daran die verschiedenen Querschnitte des Schneckenkanales und bemerken zugleich, daß um die Spindel mit und in dem Kanale sich eine Knochenleiste, Lamina spiralis genannt, windet, wie etwa das Schraubengewinde eines Propfenziehers um seine Achse (vergl. Fig. 11). Diese Knochenleiste selbst erreicht überall nur etwa die halbe Höhe des Schneckenkanales, aber von ihrer freien Kante aus spannen sich im Ohre des Lebenden zwei Membranen zur Kuppe des Kanales, die zwischen sich einen in seinem Durchschnitte dreieckigen Hohlraum, den Schneckengang (Ductus cochlearis) einschließen. Diejenige dieser beiden Membranen, die die direkte Fortsetzung der Lamina spiralis bildet, ist die Basilarmembran. Im Vereine mit der Lamina stellt sie eine Scheide-

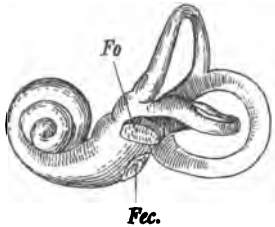


Fig. 9. Linkes Labyrinth von außen.

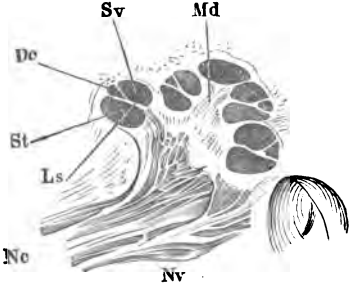


Fig. 10. Durchschnitt der Schnecke. Dreimal vergrößert.

Md Modiolus; Sv Scala vestibuli; Dc Ductus cochlearis; St Scala tympani; Ls Lamina spiralis; Nc und Nv Nerven.

Digitized by Google

wand dar, durch welche der Schneckenkanal seiner ganzen Länge nach in zwei Teile, die Paukentreppe und die Vorhofstreppe (Scala tympani und Scala vestibuli) geteilt wird, die ihrerseits in der Kuppel der Schnecke dort, wo die knöcherne Lamina in Form eines Hakens (Hamulus; Fig. 11) endigt, miteinander kommunizieren. Die Vorhofstreppe hängt direkt mit dem Vorhofe zusammen. Der andere Gang ist dagegen von diesem durch die Scheidewand abgesperrt; in seinem Anfange liegt nächst der Basis der Schnecke das runde Fenster, das, wie erwähnt, an die Paukenhöhle grenzt.

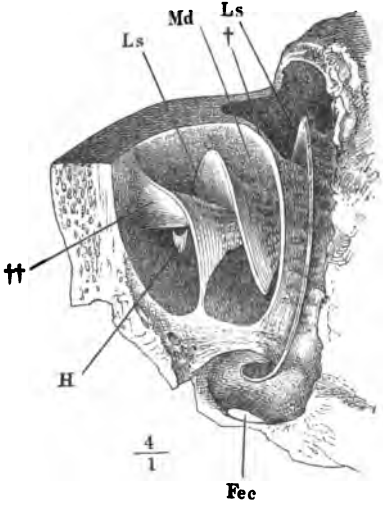


Fig. 11. Knöcherne (rechte) Schnecke, von vorn geöffnet.

Md Modiolus; Ls Lamina spiralis; H Hamulus; Fec Fenestra cochleae; † Durchschnitt der Zwischenwand der Schnecke; †† oberes Ende derselben.

Das Trommelfell ist durch seinen eigentümlichen Bau sowie auch wegen seiner einseitigen Belastung durch die Gehörknöchelchen und die an deren Kette unmittelbar anstoßende Labyrinthflüssigkeit befähigt, mit Tönen von verschiedenster Höhe gleich gut mitzuschwingen. Wenn Tonwellen das Trommelfell in Schwingungen versetzen, so pflanzen sich diese auf die Gehörknöchelchen und weiter auf das Labyrinthwasser fort. Die physikalische Beschaffenheit des Trommelfelles und der Knöchelchenkette bringt es mit sich, daß der Schall, welcher, durch die Luft dem Ohre zugeführt, das Trommelfell mit relativ großer Amplitude und geringer Kraft trifft, auf dem Wege durch den Mittelohrapparat an Amplitude verliert und dafür an Kraft gewinnt. Der Steigbügel wird, so oft eine Luftverdichtung

Digitized by Google

das Trommelfell nach einwärts drückt, mit verhältnismäßig großer Energie in das Labyrinth hineingeschoben und treibt das Labyrinthwasser vor sich her, welches, rings von den festen Knochenwänden eingeschlossen, nur einen Ausweg hat, nämlich das runde Fenster mit seiner nachgiebigen Membran, und daher diese ausbuchtet. Den entgegengesetzten Effekt hat natürlich eine Luftverdünnung im Gehörgange, durch welche Trommelfell, Gehörknöchelchenkette und Labyrinthwasser nach auswärts bewegt werden. So werden also die Schallschwingungen der im äußeren Gehörgange enthaltenen Luft zum Labyrinthwasser und damit zu der von diesem umgebenen Basilarmembran fortgeleitet. Letztere trägt nun auf der der Vorhofstreppe zugewendeten Seite längs ihres ganzen schraubenförmigen Verlaufes die Endausbreitung des, durch die Spindel und die Lamina zur Basilarmembran tretenden, Gehörnerven, ein unter dem Namen des Cortischen Organes bekanntes, sehr kompliziertes Gebilde von Zellen, unter denen die Cortischen Pfeilerzellen sich besonders durch ihre Größe und Form auszeichnen. Die Schwingungen der Basilarmembran können mithin unmittelbar auf den Nerven übergehen und ihn erregen.

Begründung der Resonanzhypothese.

Aus dem Umstande, daß die Basilarmembran durch einen in ihrer Längsrichtung wirkenden Zug leicht zerrissen wird, während ihre Querfasern eine ziemlich beträchtliche Festigkeit besitzen, schließt Helmholtz, daß diese Membran auch in ihrer natürlichen Befestigung in der Querrichtung (von der Lamina zur äußeren Schneckenwand) stark gespannt ist, in der Längsrichtung dagegen nur sehr schwach. „Wenn aber", sagt Helmholtz zur Begründung seiner Resonanzhypothese, „die Spannung in Richtung der Länge verschwindend klein ist gegen die Spannung in Richtung der Breite, dann verhält sich die Membrana basilaris annähernd so, als wären ihre Radialfasern ein System von gespannten Saiten, deren membranöse Querverbindung nur dazu dient, dem Drucke der Flüssigkeit gegen diese Saiten eine Handhabe zu geben.

Digitized by Google

Dann werden die Gesetze ihrer Bewegung dieselben sein, als wäre jede einzelne dieser Saiten in ihrer Bewegung unabhängig von den anderen, und folgte, jede für sich, der Einwirkung des periodisch wechselnden Druckes des Labyrinthwassers in der Vorhofstreppe. Es würde demnach ein erregender Ton namentlich diejenige Stelle der Membran in Mitschwingen versetzen, wo der Eigenton der gespannten und mit den verschiedenen Anhangsgebilden belasteten Radialfasern der Membran dem erregenden Tone am nächsten entspricht; von da würden sich die Schwingungen in schnell abnehmender Stärke auf die benachbarten Teile der Membran ausbreiten."

Soll die Basilarmembran wirklich ein System abgestimmter Saiten sein, so müssen sich für die hohen Töne kurze Saiten, für die tiefen Töne längere vorfinden. Dieser Forderung entspricht in der Tat das Ergebnis der anatomischen Messungen. Die Basilarmembran ist an ihrem Anfange, dem ovalen Fenster gegenüber, relativ schmal und nimmt nach der Schneckenspitze hin allmählich um mehr als das Zwölffache an Breite zu. Die Fasern für die tiefsten Töne liegen demnach am oberen Ende der Schnecke, diejenigen für die höchsten am Anfangsteile. Auch die Frage, ob die Anzahl der vorhandenen Basilarfasern ausreicht für die große Menge von Tönen, die unser Ohr zu unterscheiden vermag, ist zu bejahen. Die Zählung hat ergeben, daß für jede Stufe der physiologischen Tonreihe mehrere Fasern zur Verfügung stehen. Eine große Schwierigkeit bereitet andererseits der Resonanzhypothese die absolute Kürze der Fasern. Es ist wirklich nur schwer vorstellbar, daß Fasern, deren Länge einen Bruchteil eines Millimeters betragen, imstande sein sollen mit Tönen mitzuschwingen, zu deren physikalischer Erzeugung wir Saiten und Gabeln

Digitized by Google

von beträchtlichen Dimensionen gebrauchen. Wenn Helmholtz darauf hinweist, daß die beanstandete Kürze der Fasern durch die erhebliche Dämpfung ausgeglichen würde, welche die Belastung der Basilarmembran mit der Flüssigkeit und den festen Gebilden zur Folge hat, so vermag diese Bemerkung doch nicht alle Bedenken ganz zu zerstreuen. Gewisse Tatsachen führen noch auf einige weitere Schwierigkeiten, die sich der Helmholtzschen Theorie entgegenstellen und verschiedene Autoren veranlaßt haben, die Resonanzhypothese teils auszubauen, teils durch andere Theorien zu ersetzen; wir wollen jedoch auf diese Versuche, über die Helmholtzsche Theorie hinauszukommen, nicht näher eingehen. Denn einerseits handelt es sich hierbei um Streitfragen, über die sich ein abgeklärtes Urteil zur Zeit noch nicht fällen läßt, und andererseits soll man eine im ganzen so vortrefflich bewährte Theorie wie die Resonanzhypothese nicht beiseite werfen, ehe nicht entweder ihre Unzulänglichkeit unwiderleglich bewiesen ist oder eine andere Theorie von allgemein anerkannter Überlegenheit an ihre Stelle gesetzt werden kann. Beides trifft für die Helmholtzsche Theorie des Hörens bis jetzt nicht zu: wir werden sie daher auch im Folgenden als Grundlage der hörtheoretischen Erörterungen beibehalten.

Die sekundären Klangerscheinungen.

Eine jede Theorie des Hörens wird in erster Linie die Klangzerlegung im Ohre zu erklären haben, in zweiter Linie aber auch noch einige andere akustische Phänomene, die unter geeigneten Umständen die Klangwahrnehmung begleiten und die man deswegen als sekundäre Klangerscheinungen bezeichnen kann.

Digitized by Google

Die Schwebungen.

Wenn zwei gleichartige, genau unisone Tonquellen gleichzeitig klingen, vermag das Ohr nicht zu erkennen, ob nur eine tönt oder beide, so einheitlich fließt der Zusammenklang dahin. Der Eindruck ändert sich jedoch, sobald eine, wenn auch nur ganz geringe, Verstimmung eintritt. Er wird ungleichmäßig, man vernimmt ein periodisches Anschwellen und Abschwellen, und diese „Schwebungen" werden um so schneller, je größer der Höhenunterschied der beiden schwebenden Töne (Primärtöne) ist. Am besten hört man die Schwebungen, wenn die Töne um etwa eine bis zwei Schwingungen differieren und dabei gleich laut sind; erheblich langsamere oder raschere Schwebungen werden undeutlich. A. Mayer hat eine Schwebung von 8 Sekunden Dauer, Rayleigh sogar solche, die 24 Sekunden währten, noch wahrgenommen, indessen haben so langsame Schwebungen für die Musik selbstverständlich keinerlei Bedeutung mehr, obwohl sonst Schwebungen von mäßiger Frequenz gelegentlich bei der Orgel oder dem Harmonium Verwendung finden, um das Tremulieren der menschlichen Stimme und der Geigen nachzuahmen.

Solange nicht mehr als 4 bis 6 Schwebungen auf die Sekunde kommen, folgt das Ohr ihnen leicht. Allerdings haben die Schwebungen hier schon den Charakter des Auf- und Abwogens verloren und machen den Eindruck von Stößen oder Schlägen, die scharf abgegrenzt und durch Pausen getrennt sind. Steigt aber die Zahl der Schwebungen auf 20 bis 30, so kann man sie nicht mehr einzeln fixieren oder zählen. Der Zusammenklang wird wirr, rollend, knarrend, obwohl der Beobachter sich noch darüber im klaren ist, daß er eine Summe von

Digitized by Google

Tonstößen hört. Nimmt die Frequenz der Schwebungen weiter zu, so geht das Rollen in eine mehr kontinuierliche Rauhigkeit über, die, wenn man den Tonhöhenunterschied der schwebenden Töne immer mehr wachsen läßt, allmählich immer undeutlicher wird und zuletzt ganz verschwindet, womit dann die Grenze für die Wahrnehmbarkeit schneller Schwebungen erreicht ist. Bezüglich dieser Grenze gibt Helmholtz an, daß 132 Schwebungen in der Sekunde noch bemerkbar seien, und meint, daß hinreichend hohe und starke Töne vielleicht noch mehr Schwebungen hören lassen möchten. Stumpf hat diese Vermutung bestätigt. Er fand bei Versuchen mit Stimmgabeln der vier- und fünfgestrichenen Oktave die Rauhigkeitsgrenze zwischen 427 und 512. Die Grenze hängt ganz wesentlich von der Höhe der schwebenden Töne ab. Je weiter man in der Tonreihe abwärts geht, um so geringer wird die Maximalzahl der hörbaren Schwebungen. Dafür nimmt nach unten die Größe des Intervalles, das noch Schwebungen hören läßt, zu. In der großen Oktave konnte Stumpf, wenn C als tieferer Ton genommen wurde, mit direkt ans Ohr gehaltenen Gabeln Schwebungen noch über die Quinte hinaus vernehmen. [R. Koenig hat mit tiefen Gabeln sogar bei Intervallen bis zum Verhältnisse 1 : 10 Schwebungen beobachtet, die er als direkte Schwebungen der Grundtöne bezeichnet, die aber wohl Schwebungen des höheren Grundtones mit Obertönen des tieferen gewesen sein werden.] In der dreigestrichenen Oktave ist ungefähr die große Terz, in der viergestrichenen die große Sekunde, in der fünfgestrichenen die kleine Sekunde das weiteste schwebende Intervall. Mit der Größe des Intervalles ändert sich ferner auch der Grad der Rauhigkeit, welcher Schwebungen von ein und derselben Frequenz zukommt.

Digitized by Google

Die Tonpaare h^1c^2 (Halbton), c^1d^1 (Ganzton), eg (kleine Terz), ce (große Terz), Gc (Quarte) und CG (Quinte) geben alle gleichviel Schwebungen, aber die Rauhigkeit derselben nimmt in der hier angegebenen Reihenfolge mehr und mehr ab.

Wie man der störenden Schwebungen wegen in tieferen Tonlagen den musikalischen Gebrauch von Terzen und von Akkorden in sogenannter enger Lage vermeidet, so sind andererseits die Schwebungen in vielen Fällen bedeutungsvoll für die Klangfarbe. Tiefere Töne werden durch das Schweben ihrer Obertöne untereinander mehr oder weniger rauh, scharf, rollend, knarrend, brummend, je nach der Lage des Grundtones und der Zahl und Stärke der Obertöne. R. Koenig will auch das Schmettern von Trompetenklängen auf Schwebungen der Obertöne zurückführen.

Ein Ton, der wegen zu geringer Stärke oder aus anderen Gründen schwer wahrzunehmen ist, macht sich dem Ohre besser bemerkbar, sobald seine Intensität periodisch zu schwanken beginnt. Man benutzt daher bei wissenschaftlichen Untersuchungen gern die Schwebungen zur Feststellung der Existenz eines Tones. Auch beim Stimmen dient bekanntlich das Verschwinden der Schwebungen als ein viel verwendetes Kriterium für die Reinheit eines Intervalles, und nicht in letzter Linie sind die Schwebungen ein einfaches Mittel, um die Schwingungszahl eines Tones festzustellen, der mit einem zweiten Tone von bekannter Höhe ungefähr übereinstimmt. Man braucht zu diesem Zwecke nur die Schwebungen nach der Uhr zu zählen: die Anzahl der Schwebungen, welche die beiden Töne in der Sekunde zusammen geben, ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen.

Digitized by Google

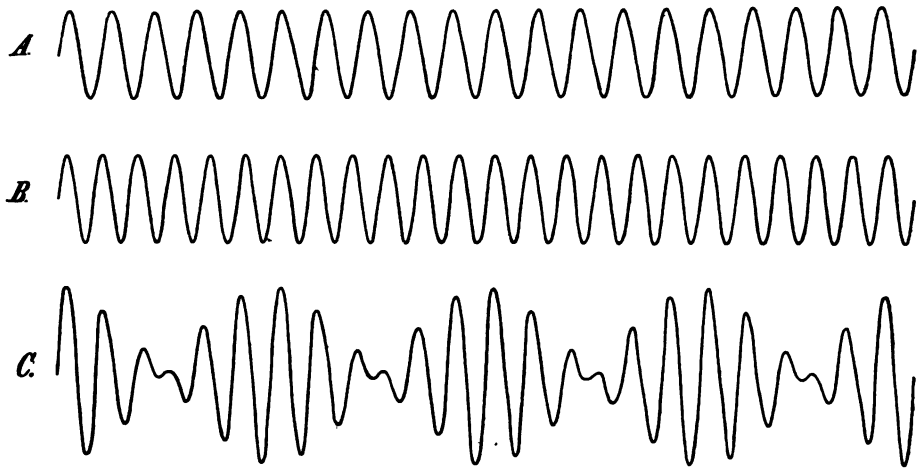


Fig. 12. Kurve (C) eines schwebenden Zweiklanges, dessen Teiltöne (A und B) im Schwingungszahlenverhältnisse 5:6 [kleine Terz] stehen.

Digitized by Google

Figur 12 mag diese Tatsache an einem Beispiele graphisch veranschaulichen. Die Abbildung A stelle einen einfachen Ton dar, welcher fünf Schwingungen in demselben Bruchteile einer Sekunde macht, in dem der Ton in B sechs vollführt. Die Zusammensetzung dieser zwei Tonwellen zu einer Klangwelle ergibt die „Schwebungskurve" der Figur 12C, deren einzelne Perioden sich deutlich voneinander abgrenzen. Wie das Ohr in jeder Schwebungsperiode ein einmaliges An- und Abschwellen der Klangintensität wahrnimmt, so sehen wir auch in der Zeichnung, daß die Klangamplitude nach der Mitte der Periode hin allmählich steigt, um dann wieder ebenso zu sinken. Man erkennt aus der Figur auch leicht die Ursache der welligen Form, die der Kurve eines schwebenden Zusammenklanges eigentümlich ist. Der Zeichnung ist die, übrigens ja willkürliche, Voraussetzung zugrunde gelegt, daß die schwingende Bewegung der Primärtöne gleichzeitig, in gleichem Sinne und mit gleicher Amplitude beginne. Es fallen also bei der Kombination im Anfange zwei Wellenberge zusammen, die sich zu einem Berge von ungefähr doppelter Höhe summieren. Nachdem Ton A $2\frac{1}{2}$ und Ton B 3 Schwingungen vollendet hat, trifft ein Wellental von A auf einen Berg von B, woraus eine entsprechende Schwächung der Gesamtamplitude folgt. Hat dann A seine ersten 5 und B seine ersten 6 Pendelschwingungen beendet, so besteht wieder die nämliche Phasengleichheit wie im Beginne und daher muß auch das nun folgende zweite Stück der Klangkurve die Form des ersten vollkommen wiederholen. Auf je eine aus 5 Schwingungen des ersten und 6 Schwingungen des zweiten Teiltones sich zusammensetzende Partie der Klangkurve kommt also eine Schwebung, und wenn die Schwingungszahlen der schwebenden Töne $5 \cdot n$ resp. $6 \cdot n$

Digitized by Google

sind, so ist die Zahl der Schwebungen in der Sekunde gleich n, also gleich der Differenz der Schwingungszahlen.

Da Figur 12C die Schwingungsform irgend eines Punktes darstellt, der gleichzeitig die beiden Pendelbewegungen A und B ausführt, so gibt sie uns auch ein Bild der Schwingungen, die der Steigbügel unter dem kombinierten Einflusse der Tonwellen A und B macht, und zeigt uns, wie er dabei dem Labyrinthwasser Impulse von periodisch zu- und abnehmender Größe erteilt. Man könnte nun zunächst auf den Gedanken kommen, daß von diesen Impulsen die ausgiebigen eben stärker und die schwächeren schwächer empfunden würden, und daß auf diese Weise das An- und Abschwellen der Klangempfindung sich sehr einfach erklären lasse. Allein es darf nicht vergessen werden, daß die Klangwelle im Ohre in ihre pendelförmigen Komponenten aufgelöst wird. Nach der Helmholtzschen Theorie wird die Kurve Figur 12C innerhalb der Basilarmembran so zerlegt, daß ein bestimmter Teil der letzteren in der Form der Figur 12A und ein zweiter, etwas näher dem Vorhofe zu gelegener, in der Art der Figur 12B schwingt. Da aber weder in A noch in B Amplitudenschwankungen vorkommen, so müßten wir nach dem, was bisher von der Helmholtzschen Theorie erwähnt wurde, eigentlich erwarten, beide Töne ohne jegliche Intensitätsschwankungen, d. h. Schwebungen, glatt nebeneinander hinfließend zu hören. Indessen macht die Erklärung des Schwebens wenig verschieden hoher Töne der Resonanzhypothese keine Schwierigkeiten. Helmholtz nimmt ausdrücklich an, daß ein einfacher Ton nicht nur eine einzige Faser der Basilarmembran in Mitschwingungen versetzt, sondern, freilich in mehr und mehr abnehmendem Grade, auch

Digitized by Google

ihre nächsten Nachbarn. Jedem Tone entspricht also in der Basilarmembran eine gewisse Erregungszone, und beim gleichzeitigen Erklingen zweier einander nahe genug liegender Töne fallen die beiden Erregungszonen zum Teil übereinander. Wir erhalten dadurch innerhalb der von den Tönen zum Mitschwingen gebrachten Partie der Basilarmembran eine mittlere gemeinschaftliche Zone, deren Basilarfasern, von beiden Tönen zugleich erregt, kombinierte Schwingungen von der Art der Figur 12C vollführen und abwechselnd kräftiger und schwächer oscillierend auch die zugehörigen Nerven bald stärker, bald weniger stark erschüttern, was dann in einem entsprechenden Schwanken der Empfindungsintensität, d. h. in der Wahrnehmung von Schwebungen, psychisch zum Ausdrucke kommt.

Die Kombinationstöne.

Die Kombinationstöne zerfallen in Differenz- und Summationstöne. Erstere sind im 18. Jahrhundert entdeckt worden von dem deutschen Organisten Sorge, welcher beobachtete, daß bei gleichzeitigem, kräftigem Erklingen zweier Orgeltöne ein dritter schwächerer in der Tiefe mitklingt, und von dem berühmten Geiger Tartini, nach dem sie auch Tartinische Töne heißen. Aber erst Hällström hat ihre Tonhöhe richtig bestimmt, indem er die Regel aufstellte, daß dieselbe gleich der Differenz der Schwingungszahlen der Primärtöne sei, und ihnen (nach dem Vorgange von Vieth) den Namen Kombinationstöne gegeben. Nachdem dann später Helmholtz durch Rechnung und Experiment gefunden hatte, daß zwei Töne von den Schwingungszahlen m und n unter geeigneten Umständen nicht nur von einem Tone, dessen Höhe gleich m — n ist, begleitet werden,

Digitized by Google

sondern auch noch von einem Tone m + n, unterschied er den Ton m — n als Differenzton von dem Summationstone m + n und nannte beide zusammen Kombinationstöne. Diese Benennungsweise ist jetzt allgemein geworden, wie auch die Bezeichnung Primärtöne für die Töne m und n.

Läßt man das Intervall zweier Töne, vom Unisono beginnend, kontinuierlich wachsen, so treten, wie wir wissen, erst langsamere, dann schnellere Schwebungen auf, und diesen gesellt sich, sobald die Schwingungszahlendifferenz der Töne über 30 hinauskommt, zuweilen schon eher, ein tiefer Differenzton bei. Das gilt sowohl für Primärtöne aus den höchsten wie aus den mittleren Regionen des Tonreiches, und nur wenn die Primärtöne selbst sehr tief und daher leise sind, ist es schwer, die noch tieferen und leiseren Differenztöne neben ihnen zu hören. Nimmt die Distanz der Primärtöne weiter zu, so steigt auch dementsprechend die Höhe des Differenztones. Man hört die Differenztöne am besten, wenn die Primärtöne ziemlich hoch und gleich laut sind; daß sie an sich sehr laut sind, ist durchaus nicht notwendig. Die Differenztöne klingen, als kämen sie von einer ziemlich nahe dem Ohre und etwas hinter demselben befindlichen Stimmgabel.*) Namentlich die tiefsten Differenztöne sind ebenso rauh, diskontinuierlich und brummend wie die Töne der ganz tiefen Gabeln.

Der Umstand, daß bei gewissen Intervallen der Primärtöne Schwebungen und Differenzton beide zugleich auftreten und daß die Zahl der Schwebungen gleich der Schwingungszahl des Differenztones ist, bildet die Ver-

*) Anmerkung: Wenn die Primärtöne beide Ohren gleich stark erregen, so verlegt man die Differenztöne in den Kopf selbst.

Digitized by Google

anlassung zu der öfter aufgestellten Behauptung, die Differenztöne entständen aus den Schwebungen. Die einzelnen Schwebungsstöße sollen mit der allmählichen Zunahme ihrer Frequenz ebenso in einen Ton übergehen, wie die einfachen Pendelschwingungen es tun. Jedoch ist diese Hypothese bisher von keinem ihrer Vertreter in hinreichendem Maße annehmbar begründet worden, weshalb wir auch nicht näher darauf eingehen wollen.

Durch sehr genaue experimentelle Beobachtungen ist festgestellt, daß zwar zuweilen, aber nur unter ganz besonderen Verhältnissen, Kombinationstöne objektiv, als pendelförmige Komponenten in die Klangwelle der Primärtöne eingehend, in der Luft enthalten sind. Es ist dies z. B. der Fall beim Harmonium, wo beide primären Töne mittelst eines gemeinschaftlichen Windkastens erzeugt werden. Hier läßt sich die objektive Existenz von Kombinationstönen durch mitschwingende Membranen oder Resonatoren nachweisen. Überall sonst aber bleibt der Versuch resultatlos, und daraus geht hervor, daß im Ohre selbst Gelegenheit zur Entstehung der Kombinationstöne gegeben sein muß. Da nun nach der Ohm-Helmholtzschen Auffassung das Ohr nur dann Töne perzipiert, wenn entsprechende pendelförmige Schwingungen die Basilarmembran treffen, so hat Helmholtz die Annahme gemacht, daß das Trommelfell und das Mittelohr der Ursprungsort der Kombinationstonwellen seien. Aber dieser Gedanke, obwohl geistreich motiviert, ist durch Beobachtungstatsachen, namentlich durch den Befund Dennerts, daß auch Personen ohne Trommelfell, Hammer und Amboß noch Kombinationstöne hören, als falsch oder wenigstens als unzureichend erwiesen. Es bleibt mithin nichts weiter übrig, als die Entstehung der Kombinationstöne ins innere Ohr zu verlegen. Wie man

Digitized by Google

sich ihr Zustandekommen daselbst vorzustellen hat, darüber gehen freilich die Ansichten augenblicklich noch weit auseinander. Am meisten Wahrscheinlichkeit dürfte die Annahme für sich haben, es werde infolge der eigenartigen Verhältnisse der schwingenden Teile im inneren Ohre die von außen kommende Klangwelle der Primärtöne so modifiziert, daß sich bei ihrer Zerlegung auch den Kombinationstönen entsprechende Pendelschwingungen ergeben.

Solange das Intervall der Primärtöne kleiner ist als eine Oktave, ist der Differenzton tiefer als der tiefere Primärton; stehen die Primärtöne gerade im Oktavenverhältnisse, so fällt der Differenzton der Rechnung nach mit dem tieferen Primärtone zusammen, und beträgt die Distanz der Primärtöne mehr als eine Oktave, so ergibt die Subtraktion für den Differenzton eine Schwingungszahl, die größer ist als die des tieferen Primärtones. Differenztöne der letzteren Art werden aber nicht oder nur ausnahmsweise gehört. Überhaupt darf man sich nicht darauf verlassen, daß man alle diejenigen Differenztöne in jedem Falle wirklich wahrnimmt, die die Rechnung in schier endloser Zahl ergibt.

Nennen wir die Schwingungszahl des höheren Primärtones h, die des tieferen t, und nehmen wir nur je zwei Obertöne als mitwirkend an, nämlich $2 \cdot h$ und $3 \cdot h$ sowie $2 \cdot t$ und $3 \cdot t$, so erhalten wir rechnerisch schon die neun Differenztöne: $h - t$, $\pm(h - 2t)$, $\pm(h - 3t)$; $2h - t$, $2(h - t)$, $\pm(2h - 3t)$; $3h - t$, $3h - 2t$, $3(h - t)$, wobei von den beiden Zeichen $\pm$ natürlich dasjenige zu wählen ist, durch welches die Differenz positiv wird. Da Differenztöne nicht nur bei entsprechend geringem Tonhöhenunterschiede mit anderen Differenztönen oder objektiven Tönen schweben, sondern auch nach allgemeiner, mehrfach experimentell bestätigter Annahme mit den Primär-

Digitized by Google

tönen oder mit deren Obertönen oder unter sich neue Differenztöne erzeugen können, so wären die obigen neun Differenztöne noch wieder voneinander und von den sechs primären Tönen zu subtrahieren, ebenso die daraus sich ergebenden neuen Werte u. s. w. Bemerkenswert ist, wie man dabei den gleichen Differenzton mit und ohne Hilfe der Obertöne errechnen kann. So leitete Hällström den Differenzton $2t - h$ ab aus $t - [h - t]$, den Differenzton $2(h - t)$ aus $h - [2t - h]$ und den Differenzton $3t - 2h$ aus $[2t - h] - [h - t]$. Der Differenzton $h - t$ wird der **erste** genannt, die übrigen sind Differenztöne **höherer Ordnung**.

Der erste Differenzton $(h - t)$ ist durchaus nicht jedesmal der stärkste; er tritt häufig gegen den zweiten Differenzton $2t - h$ zurück. Bei sehr kleinen Intervallen bis zum Halbton hört man nur den ersten Differenzton. Mit zunehmender Distanz der Primärtöne wird daneben auch der zweite bemerkbar, der zunächst höher als der andere ist. Bei der Quinte fallen beide zusammen und treten jenseits derselben wieder auseinander, indem dann der zweite der tiefere wird. Beim Septimenintervalle wird in der Regel nur noch der zweite Differenzton gehört. Im allgemeinen läßt es sich jedoch nicht mit voller Bestimmtheit vorhersagen, welche Differenztöne man in einem speziellen Falle hören oder nicht hören wird, da wir die Bedingungen ihrer Entstehung noch nicht genügend kennen.

Ist eine Quinte nicht ganz rein gestimmt, so macht sich dies durch die Schwebungen der Differenztöne $h - t$ und $2t - h$ bemerkbar. Wählen wir als Beispiel zwei Töne mit den Schwingungszahlen 200 und 299, so ist $h - t = 99$, $2t - h = 101$, und beide geben zusammen 2 Schwebungen in der Sekunde. Man kann diese Art

Digitized by Google

von Differenztonschwebungen beim Quintenstimmen ebenso als Kriterium für den Grad der erreichten Reinheit benutzen wie beim Oktavenstimmen die Schwebungen des höheren Tones mit dem Obertone des tieferen, die, solange sie noch wahrnehmbar sind, die Unreinheit des Intervalles beweisen. Da die Töne c′, e′, g′ im Verhältnis 4 : 5 : 6 stehen und sowohl 4 und 5 als auch 5 und 6 denselben Differenzton 1, nämlich C geben, so wird man auch hier das mitklingende C schweben hören, wenn der Dreiklang nicht vollkommen rein ist.

Was die bereits erwähnten Summationstöne betrifft, so sind sie bei weitem weniger leicht zu hören als die Differenztöne, wie schon daraus hervorgeht, daß sie soviel später als diese entdeckt wurden. Ihrer geringen Stärke wegen sind sie für die Musik belanglos, und das ist insofern ein günstiger Umstand, als sie mit den beiden primären Tönen meist unharmonische Intervalle bilden würden. So ist der Summationston der Quarte (3 : 4) die natürliche Septime (7) des höheren, derjenige der großen Terz (4 : 5) die None (9) des tieferen Primärtones. Ebenso geben die kleine Terz und die kleine Sexte ganz unharmonische Summationstöne und nur die Oktave, Quinte und große Sexte harmonische.

Digitized by Google

Die Tonerzeugung und die wichtigsten Instrumente.

Wenn auch, wie wir gesehen haben, neben mancherlei Geräuschen die Schwebungen und Kombinationstöne einen gewissen Einfluß auf die Klangfarbe ausüben können, so ist dieselbe doch im wesentlichen bedingt durch die Art, wie sich der Klang aus Teiltönen zusammensetzt. Die Zahl, Höhe und Stärke der letzteren hängt aber von den physikalischen Verhältnissen des betreffenden Instrumentes ab, welche darum zugleich für dessen musikalische Brauchbarkeit und Verwendung maßgebend sind. Wenn wir daher im folgenden die wichtigsten Tonerzeugungsmittel einer Erörterung unterziehen wollen, so wird dies hauptsächlich vom physikalischen Standpunkte aus geschehen müssen.

Die Saiten und Saiteninstrumente.

Wirft man einen Stein in ruhendes Wasser, so erzeugt er durch seinen Fall momentan eine Vertiefung in der Wasseroberfläche, um die herum sich ein ringförmiger Wasserwulst bildet. Handelt es sich dabei um eine außerordentlich ausgedehnte freie Wasserfläche, so schreitet der Wellenring von seiner Erregungsstelle aus ungestört weiter und weiter vorwärts, bis die Bewegung

Digitized by Google

schließlich erlischt. Ein solcher Vorgang bietet uns das Bild einer fortschreitenden transversalen Wellenbewegung. Das Verhalten ändert sich, wenn die Welle auf ein Hindernis trifft und in der Fortpflanzungsrichtung zurückgeworfen wird. Spannen wir beispielsweise einen nicht zu kurzen Gummischlauch mäßig straff zwischen zwei festen Punkten aus, indem wir etwa seine beiden Enden an zwei einander gegenüber stehenden Tischen mit Schrauben befestigen, und führen dann in unmittelbarer Nähe des einen Endpunktes einen kurzen, scharfen Schlag gegen den Schlauch, so schreitet die Erschütterung in Form einer transversalen Welle über denselben hin bis zum anderen Ende fort, wird hier zurückgeworfen, gelangt wieder zum Ausgangspunkte, kehrt abermals um und läuft so einige Male bis zu ihrem allmählichen Verschwinden hin und her. Wir haben es in diesem Falle mit einer reflektiert fortschreitenden Transversalwelle zu tun. Wird nicht nur eine einzige Welle, sondern werden an irgend einer Stelle des Schlauches mehrere regelmäßige Schwingungen erregt, so werden die von der Erregungsstelle aus zu den festen Endpunkten hineilenden Wellen den von dort zurückgeworfenen begegnen und sich mit ihnen nach dem früher erörterten Prinzip der Superposition zu einer Resultierenden zusammensetzen. Der Effekt ist der, daß alle Punkte des Schlauches gleichzeitig in charakteristischer Weise hin und her schwingen; es bildet sich eine stehende transversale Welle.

Die transversalen Saitenschwingungen.

Figur 13a zeigt uns eine stehende Transversalwelle von einfachster Form: eine gespannte Saite schwingt als Ganzes hin und her zwischen den durch die dick-

Digitized by Google

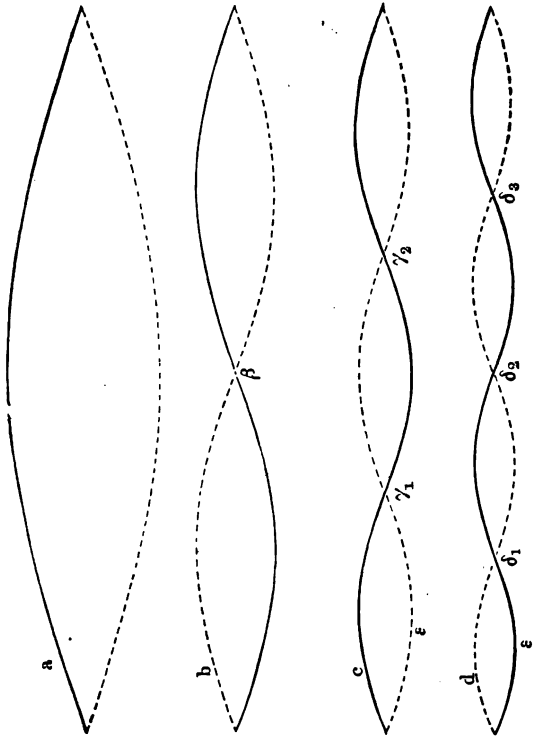


Fig. 13. Saitenschwingungen.

ausgezogene und die punktierte Linie angedeuteten Endlagen. In der Mitte ihrer Länge erfährt die Saite die stärkste Ausbiegung; sie schwingt mit einem Schwingungsbauche. Die Endpunkte, an denen sie befestigt

Digitized by Google

ist und die daher an der schwingenden Bewegung nicht teilnehmen, sind sogenannte Knotenpunkte.*)

Die Saite in Figur 13a oscilliert pendelförmig um ihre Gleichgewichtslage, weshalb das akustische Resultat ihrer Bewegung ein einfacher Ton sein muß. Die Höhe desselben hängt von der Länge, der Spannung, der Dicke und dem Materiale der Saite ab. Je kürzer sie bei gegebener Spannung und Dicke ist, um so höher ist ihr Ton. Schon Pythagoras und seine Schüler haben den Klang, den eine in ihrer ganzen Länge schwingende Saite gibt, mit den Klängen verglichen, welche sie hervorbringt, wenn sie auf diesen oder jenen bestimmten Bruchteil verkürzt wird. Sie erkannten dabei, daß die den Saitenlängen $1, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}$ entsprechenden Töne in einem eigentümlichen, sich dem Bewußtsein von selbst aufdrängenden Verwandtschaftsverhältnisse stehen. Man kann ihre Versuche leicht an einem Monochord wiederholen. Dieses Instrument besteht aus einem mit genauer Maßteilung versehenen Resonanzkasten, über dem eine Saite ausgespannt ist, deren Spannung durch Gewichte reguliert werden kann, während der schwingende Teil der Saite

*) Anmerkung: An einem passend gespannten, etwa 1 m langen Bindfaden, der in der Mitte angeschlagen wird, kann man solche stehenden Schwingungen nach Art der Figur 13a ganz bequem beobachten. Allerdings bilden sich die stehenden Wellen in den kurzen Fäden und Saiten momentan, so daß eine Entwickelung derselben aus der Interferenz vorwärts schreitender und reflektierter Wellen nicht sichtbar wird. Auch auf einer eng umgrenzten Wasserfläche lassen sich stehende Wellen leicht durch rhythmische Erschütterungen erzeugen. Man sieht dann, wie sich das Wasser an ein und derselben Stelle abwechselnd hebt und senkt, ohne daß die Bewegung den Ort wechselt: daher eben „stehende" Welle im Gegensatze zur „fortschreitenden".

Digitized by Google

sich durch einen verschiebbaren Steg begrenzen läßt. Nehmen wir an, die ganze Saite sei zunächst so lang, daß sie zwischen den Grenzstegen frei schwingend den Ton c gäbe, so erzeugt sie, um die Hälfte verkürzt, den Ton c^1, also die Oktave, den Ton von der doppelten Schwingungszahl. Wird die Saite auf $\frac{2}{3}$ verkürzt, so läßt sie die Quinte $g = \frac{3}{2} \cdot c$ hören; reduziert man die Länge auf $\frac{1}{3}$, so erklingt die Duodezime $g^1 = 3 \cdot c$. Wird der verschiebbare Steg auf $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Länge eingestellt, so resultiert die Doppeloktave $c^2 = 4 \cdot c$, und $\frac{3}{4}$ der anfänglichen Länge ergeben die Quarte $f = \frac{4}{3} \cdot c$. Soviel uns bekannt ist, wußten zwar die alten Griechen noch nichts von den Schwingungszahlen der Saiten, aber ihre Beziehung der Töne auf die Saitenlängen kam insofern auf dasselbe hinaus, als die Saitenlängen im umgekehrten Verhältnisse zu den Schwingungszahlen stehen. Den definitiven Nachweis, daß die Schwingungszahl das Bestimmende für die Tonhöhe ist, erbrachte erst der französische Mönch Mersenne (1588 bis 1648), obwohl auch schon Zarlino einige Jahrzehnte zuvor bemerkt hatte, daß eine tiefer klingende Saite langsamere Schwingungen macht als eine höher klingende.

Wird eine Saite unter sonst gleichbleibenden Umständen stärker gespannt, so erhöht sich der Ton. Die Spannung wird bei den Streichinstrumenten durch Drehen der Wirbel reguliert; um die Schwingungszahl auf das Doppelte, Dreifache, Vierfache zu erhöhen, muß die

Digitized by Google

Spannung auf das Vier-, Neun-, Sechzehnfache gebracht werden. Bezüglich des Druckes, welcher durch die Spannung der Saiten auf den Resonanzboden der Saiteninstrumente ausgeübt wird, mag beiläufig erwähnt werden, daß er bei modernen Klavieren mehr als 200 Zentner beträgt, bei der Violine $28\frac{1}{2}$ kg, bei der Viola 31 kg, beim Violoncell 45 kg, beim Kontrabaß 200 kg.

Mit zunehmender Dicke der Saite werden deren Schwingungen langsamer und ihr Ton entsprechend tiefer. Eine Verdoppelung, Verdreifachung, Vervierfachung des Durchmessers läßt die Schwingungszahl auf die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel heruntergehen. Auch die Erhöhung des Gewichtes einer Saite vertieft den Ton, weshalb die tieferen Saiten der Instrumente mit Metalldraht übersponnen werden.

Die mathematische Physik vermag nach einer bestimmten Formel aus der gegebenen Länge und Spannung einer Saite, aus ihrem Querschnitte und ihrem spezifischen Gewichte den Ton zu berechnen, den dieselbe hervorbringt, wenn man sie in Schwingungen nach Art der Figur 13a versetzt. Dieser Ton ist ihr Grundton, aber nicht der einzige, dessen sie fähig ist; sie vermag, auch ohne daß man an ihrer Länge oder ihren sonstigen Eigenschaften irgend etwas ändert, noch eine Reihe von Obertönen zu geben, deren Schwingungszahlen zu der des Grundtones in harmonischem Verhältnisse stehen. Die Figur 13b stellt den Schwingungszustand dar, welcher der Saite eigen ist, wenn sie statt des Grundtones den ersten Oberton, die Oktave des Grundtones, hören läßt. Die Saite teilt sich dabei in zwei gleiche Teile, die gleichzeitig, aber mit entgegengesetzter Phase schwingen, so daß die eine Hälfte vorwärts schwingt, während die andere zurückgeht und umgekehrt. Im

Digitized by Google

Punkte β findet überhaupt keine Bewegung statt. Die Saite hat also außer an den Enden noch in der Mitte einen Knotenpunkt und zwei Schwingungsbäuche. Ganz analog teilt sich die Saite in Figur 13c in drei, in Figur 13d in vier Teile (γ und δ sind Knotenpunkte, ε Bäuche) und ist in Figur 13c die Schwingungszahl die dreifache (Duodezime), in Figur 13d die vierfache (Doppeloktave) des Grundtones. Die einzelnen Schwingungsformen der Figur 13 bringt man nach Helmholtz an einer des Tönens fähigen Saite am reinsten hervor, wenn man auf ihren Resonanzboden eine angeschlagene Stimmgabel aufsetzt, welche denjenigen Ton gibt, der der entsprechenden Schwingungsform zugehört; dabei kann man die Knotenpunkte durch kleine Papierreiterchen kenntlich machen, welche an den Knotenstellen hängen bleiben, während sie am Orte eines Schwingungsbauches von der vibrierenden Saite abgeworfen werden.

Die Klänge der Saiteninstrumente.

Nach dem Schema der Figur 13 wird der Leser ohne weiteres imstande sein, sich die irgend einem Obertone entsprechende Schwingungsform einer Saite vorzustellen. Hat sich die Saite in n gleiche Teile geteilt, so gibt sie eben den $n - 1^{ten}$ Oberton ihres Grundtones. In allen Schwingungsformen der Figur 13 bewegt sich jeder Punkt der Saite in Pendelschwingungen um den Ort, den er bei ruhender Saite einnimmt, oscillierend hin und her; eine Bewegungsart, die, wie wir wissen, die Empfindung eines einfachen Tones zur Folge hat. In der musikalischen Praxis kommt jedoch so gut wie niemals eine dieser einfachen Schwingungsformen der Figur 13 rein zustande. Vielmehr bringen

Digitized by Google

die üblichen Methoden, eine Saite in Schwingungen zu versetzen, stets eine Kombination von mehreren derselben zuwege. Die Saiten unserer Musikinstrumente geben also nicht Töne, sondern Klänge, die aus dem Grundtone der Saite und diversen Obertönen oder auch nur aus Obertönen bestehen.

Von der Fähigkeit der Saiten, sich unter Bildung von Knotenpunkten in gesondert schwingende Abteilungen zu zerlegen, macht man in der musikalischen Praxis beim sogenannten Flageolettieren Gebrauch, um auf einem Instrumente Töne hervorzubringen, für die keine eigentliche Saite vorhanden ist. So hat bekanntlich die Violine gleich den ihr nachgebildeten Streichinstrumenten Viola (Bratsche), Violoncello und Kontrabaß nur vier Saiten. Die Grundtöne der Violinsaiten sind g, d^1, a^1, e^2, die der Viola c, g, d^1, a^1, die des Cellos C, G, d, a und diejenigen des Kontrabasses E_1, A_1, D, G. Setzt man nun beispielsweise auf die Mitte der g-Saite einer Violine einen Finger lose auf, so entsteht hier beim Anstreichen ein Knotenpunkt und man hört den Flageoletton g^1, die Oktave, indem jede der Saitenhälften für sich schwingt; soll die Duodezime erklingen, ist der Finger an einem Drittel der Saitenlänge (vom Sattel aus gemessen) aufzusetzen, wodurch die Saite veranlaßt wird, sich in drei untereinander gleiche schwingende Abteilungen zu zerlegen, und so kann man auf allen Saiten Flageolettöne durch Berühren eines der entsprechenden Knotenpunkte hervorrufen.

Beim Spiele der Harfe, Guitarre, Zither und ähnlicher Instrumente werden die Saiten gerissen, indem man sie mit dem Finger, mit einem Stift (Plektron, Ring der Zitherspieler) oder auch mittelst eines gespitzten Federkieles, wie bei der Mandoline, zur Seite zieht

Digitized by Google

und dann losläßt. Auch das Pizzikato der Streichinstrumente ist hierher zu rechnen. Die Saiten der modernen Hammerklaviere werden mit weichen Klöppeln geschlagen, während die Saiten des älteren Klavizimbals mit Rabenkielen gezupft wurden. Für die Zusammensetzung des Klanges aus Teiltönen und folglich für die Klangfarbe ist in allen hierher gehörigen Fällen sowohl die Art und die Stelle des Anschlages als auch die Dicke, Steifigkeit und Elastizität der Saite maßgebend.

Beim Reißen der Saite mit dem Finger oder Stift bildet sich an dem betreffenden Punkte eine mehr oder weniger scharfe Ecke, und die Saite nimmt damit eine Schwingungsform an, welche einen obertonreichen Klang ergibt, dessen Charakter um so klimpernder und leerer wird, je schärfer die Knickung ausgeprägt ist und je mehr die Obertöne den Grundton an Stärke überwiegen. Um einem Klaviere einen edlen harmonischen Klang zu geben, ist es daher nötig, die Pianofortehämmer leicht beweglich, elastisch und weich zu machen. Sie werden zu diesem Zwecke mit verschiedenen Lagen von Filz überzogen, so daß der Hammer nicht mit plötzlichem Stoße gegen die Saite fährt, sondern sich ihr mit einer gewissen Weichheit und während einer gewissen Zeit anlegt, um alsdann elastisch zurückzuspringen. Auf diese Weise kommt die Saite nicht ruckweise, sondern mehr gleichmäßig in Bewegung und wird die Stärke der hohen Obertöne wesentlich vermindert.

Von dem Orte des Anschlages hängt die Klangfarbe insofern ab, als in einem Saitenklange solche Obertöne nicht enthalten sein können, die an der Anschlagstelle einen Knotenpunkt haben, während diejenigen, die an dieser Stelle einen Schwingungsbauch besitzen, begünstigt

Digitized by Google

werden müssen. Schlägt man z. B. eine Saite gerade in der Mitte an, so fallen alle geradzahligen Teiltöne weg, wodurch der Klang hohl und näselnd wird. Reißt man dagegen die Saite in einem Drittel ihrer Länge, so wird der dritte, sechste, neunte, zwölfte u. s. w. Partialton nicht zustande kommen können. Bei den Pianofortes liegt erfahrungsmäßig die günstigste Anschlagstelle der mittleren Saiten in einem Siebentel bis einem Neuntel der Länge.

Der Einfluß des Materiales der Saite auf die Klangfarbe beruht namentlich darauf, daß steife Saiten sich nicht mehr in so kurze Abteilungen teilen können, wie es zur Erzeugung hoher Obertöne nötig ist. Bei dünnen, biegsamen Saiten bilden sich letztere leichter, und da die Teiltöne vom achten ab in der Skala einander sehr nahe liegen, so entsteht dann jene Art von Klangfarbe, die als das Klimpern der dünnen Saiten bekannt und eine besondere Eigentümlichkeit der Zither ist. Der Klang gezupfter Darmsaiten (Guitarre, Harfe) ist weniger klimpernd, weil ihre hohen Töne wegen der geringen Elastizität schneller gedämpft werden. Für den Klang der Darmsaiten kommt außerdem noch in Betracht, daß sie bei gleicher Festigkeit leichter sind als Metallsaiten und deshalb höhere Töne geben.

Während die gezupfte oder geschlagene Saite, nachdem sie in Bewegung gesetzt ist, mit selbständigen Schwingungen mehr oder weniger rasch verklingt, hält der Ton der gestrichenen Saite unter der Wirkung des Bogens an. Letztere hat man sich in folgender Weise vorzustellen. Das Haarband des Bogens faßt die Saite, zieht sie aus der Ruhelage heraus und nimmt sie soweit mit, wie ihre wachsende Biegungsspannung es gestattet. Schließlich reißt die Saite sich los und

Digitized by Google

springt mit plötzlichem Ruck zurück, um aber alsbald aufs neue vom Bogen gefaßt zu werden. Es leuchtet ohne weiteres ein, daß die Schwingungsform der Saite wesentlich von der Art der Bogenführung bedingt ist. Die Stärke des Tones wechselt mit der Kraft des Striches, und der Klangcharakter steht in engster Beziehung nicht nur zu der Strichstelle sondern auch zu der Schnelligkeit, Gleichmäßigkeit und Geschwindigkeit des Striches.

Die Schönheit und Fülle des Klanges der Streichinstrumente hängt daher in hohem Grade von der Kunst des Spielers ab, außerdem aber auch noch von der Güte des Resonanzkörpers, welchem, wie bereits früher erörtert wurde, die Aufgabe zufällt, den Saitentönen die nötige Kraft zu verleihen. Die Endpunkte der schwingenden Saiten sind zwar im akustischen Sinne ruhende Punkte (Knotenpunkte), durch ihre Vermittelung aber werden die Tonschwingungen auf die Lager, in denen die Saiten befestigt sind, oder auf den Steg, auf dem sie ruhen, und von hier aus auf den Resonanzkörper übertragen. Der beste Resonanzkörper ist derjenige, welcher alle Töne so gleichmäßig verstärkt, daß ihr Intensitätsverhältnis das von den Saiten gegebene bleibt. Das Ziel, die Schwingungserschütterungen der Saiten auf eine möglichst große mitschwingende Fläche zu übertragen, kann man durch eine Resonanzplatte, wie wir sie als Resonanzboden beim Klaviere finden, oder durch einen Hohlkörper, wie das Korpus der Streichinstrumente, erreichen. In letzterem Falle kommt auch die im Resonanzraume eingeschlossene und durch die *f*-artigen oder sonst irgendwie geformten Ausschnitte mit der Atmosphäre kommunizierende Luft für die Verstärkung und Färbung des Klanges in Betracht. Die Gesetze für die günstigste Beschaffenheit der Resonanzkörper sind, soweit überhaupt

Digitized by Google

schon bekannt, empirisch gefunden und lassen sich zur Zeit noch nicht einfach und allgemein formulieren. Klavier- und Geigenbau sind immer noch weit mehr eine Kunst als eine Wissenschaft.

Die Blasinstrumente.

Gleich den transversalen gehen die longitudinalen Tonwellen, wenn sie in ihrer Fortpflanzungsrichtung reflektiert werden, aus der fortschreitenden in die stehende Form über, an der man ebenfalls Bäuche und Knoten zu unterscheiden hat. Eine wesentliche Differenz zwischen der transversalen und der longitudinalen stehenden Welle besteht nur hinsichtlich der Richtung, in der die schwingenden Punkte ihre Oscillationen vollführen. Wir haben früher, in Figur 4, das Bild einer longitudinalen fortschreitenden Welle aus einer entsprechenden transversalen dadurch gewonnen, daß wir die jeweiligen Abstände der einzelnen Punkte von ihrer Gleichgewichtslage nach rechts resp. links verlegten, statt sie wie bei der Transversalwelle nach oben resp. unten zu zeichnen. Durch die nämliche Abänderung wird nun auch die graphische Darstellung einer stehenden Transversalschwingung (Fig. 13) in die einer longitudinalen verwandelt. Indessen dürfte das Wesen der stehenden Longitudinalschwingung durch eine Beschreibung des Bewegungsvorganges anschaulicher werden als durch die Zeichnung.

Erzeugen wir mit Hilfe eines langen Gummischlauches, dessen eines Ende an irgend einem Gegenstande befestigt ist und dessen anderes Ende wir in der Hand halten, durch passende Auf- und Abbewegungen der letzteren eine stehende Transversalwelle, so schwingen, wie wir wissen, alle zwischen zwei benachbarten Knoten

Digitized by Google

A und B befindlichen Punkte gleichzeitig erst aufwärts, dann abwärts, dann wieder aufwärts u. s. w. Die Punkte zwischen B und dem nächsten Knotenpunkte C verhalten sich ebenso, nur erhebt sich der Bauch BC nach oben, wenn der Bauch AB nach unten geht, und umgekehrt. Stellen wir uns nun vor, in dem Schlauche finde an Stelle der transversalen eine entsprechende longitudinale stehende Wellenbewegung statt. Bei einer solchen schwingen die Punkte des Bauches AB nicht zwischen A und B auf und nieder, sondern hin und her, abwechselnd das eine Mal nach A, das andere Mal nach B hin. Das Gleiche geschieht auf der Strecke BC und zwar so, daß, wenn alle Punkte zwischen A und B in der Bewegung auf B zu begriffen sind, auch alle Punkte zwischen B und C nach B hinstreben. B ist also zu dieser Zeit das Zentrum einer Verdichtung. Nach Verlauf einer halben Schwingungsdauer ist B dagegen der Mittelpunkt einer Verdünnung, da dann die Bewegung aller Punkte von B weg nach A beziehungsweise nach C gerichtet ist, und nunmehr sind A und C Verdichtungszentren. An jedem Knotenpunkte, der ja selbst an der Schwingung nicht teilnimmt, bilden sich also abwechselnd Verdichtungs- und Verdünnungsmaxima: die Knotenpunkte der Longitudinalwelle sind Stellen größter Druckschwankung, während in der Mitte des Bauches die lebhafteste Hin- und Herbewegung vor sich geht und die Dichtigkeit unverändert bleibt.

Stehende Longitudinalschwingungen.

Longitudinalschwingungen kann man in verschiedenen Körpern und auf verschiedene Weise hervorrufen. Hält man beispielsweise einen Stab in der Mitte fest und reibt ihn in der Längsrichtung mit einem mit Harz

Digitized by Google

bestrichenen Tuchlappen, so läßt er einen Ton hören, einen sogenannten Longitudinalton. Durch das Reiben werden nämlich Verschiebungen der Moleküle erzeugt, Verdichtungen und Verdünnungen, die gegen die Enden des Stabes fortschreiten und dort eine Reflexion erleiden. Infolge davon bilden sich stehende Schwingungen, die wir als Longitudinalton vernehmen. Weil die Enden des Stabes frei sind und deswegen die Schwingungen daselbst ungestört hin und her gehen können, entwickelt sich an jedem Ende ein Schwingungsbauch, in der Mitte dagegen ein Knoten. Klemmt man eines der Enden oder beide in einen Schraubstock, so entsteht anstatt des Bauches ein Knoten, wie überhaupt an jeder Stelle, wo die Moleküle durch Fixierung am freien Schwingen verhindert werden.

Ähnlich wie ein Stab mit zwei freien Enden verhält sich die Luft in einer an beiden Enden offenen, sagen wir cylindrischen Röhre. Auch in dieser geht die Bildung einer stehenden Welle aus einem in die Röhre eindringenden und an den Enden reflektierten Longitudinalwellenzuge — die Luft und alle gasförmigen Körper sind ihrer Natur nach nur longitudinaler Tonschwingungen fähig — in der Weise vor sich, daß an den Grenzen der Röhre gegen die umgebende Luft die Mitte eines Bauches gelegen ist und im Inneren in symmetrischer Lage ein oder mehrere Knoten auftreten. Von der Anzahl der letzteren hängt die Höhe des Tones ab. Ist nur ein Knoten vorhanden, der dann die Mitte der Röhre einnimmt, so läßt diese ihren tiefsten Ton, den Grundton, hören. Bei 2, 3, 4, ..., n Knoten ist die Schwingungszahl das 2-, 3-, 4-, n-fache von derjenigen des Grundtones. Eine an beiden Enden offene Röhre vermag also gleichwie die gespannte Saite außer

Digitized by Google

ihrem Grundtone die ganze Reihe der harmonischen Obertöne zu geben. Hiervon kann man sich leicht durch folgende Betrachtung überzeugen. Die Abbildungen der Figur 14 sollen nacheinander den Schwingungszustand einer beiderseits offenen Röhre darstellen, die ihren Grundton, die Oktave, die Duodezime und die Doppel-

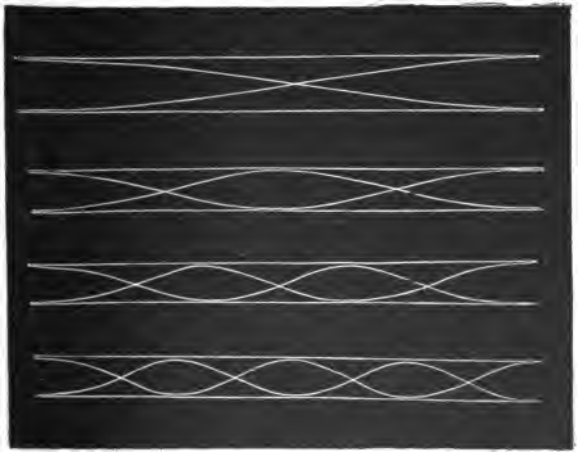


Fig. 14. Stehende Luftschwingungen in einer beiderseits offenen Röhre. (Nach Jonquière, Musikalische Akustik. Leipzig 1898.)

oktave gibt. Dabei ist zur besseren Veranschaulichung der Knoten und Bäuche in der Zeichnung die transversale Wellenform verwendet. Da nun, wie die Physik lehrt, der Abstand zweier aufeinander folgender Knoten oder Bäuche einer stehenden Welle eine halbe Wellenlänge oder, was dasselbe ist, die Distanz zwischen einem Knoten und der Mitte des nächsten Bauches eine Viertel-

Digitized by Google

wellenlänge beträgt, so ist in Figur 14a die Länge der Röhre $L = \frac{1}{2}l$, also die Wellenlänge $l = 2L$, und da ferner die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der stehenden Welle mit der der fortschreitenden übereinstimmt, so ergibt sich die Schwingungszahl n des Tones direkt aus der bereits früher abgeleiteten Formel $n = \frac{c}{l}$, wenn wir für l den Wert 2L einsetzen. Wir erhalten so für die Röhre mit 1 Knoten $n = 1 \cdot \frac{c}{2L}$. In Figur 14b ist $L = l$. Für die Röhre mit 2 Knoten ergibt sich also $n = 2 \cdot \frac{c}{2L}$, und ebenso ist für Figur 14c resp. 14d die Schwingungszahl $n = 3 \cdot \frac{c}{2L}$ resp. $4 \cdot \frac{c}{2L}$. Überhaupt ist in jedem Falle $n = k \cdot \frac{c}{2L}$, wenn k die Anzahl der Knoten bedeutet.

Etwas anders gestalten sich die Verhältnisse, falls die Röhre nur ein offenes Ende besitzt. Tritt dann in dieses eine fortschreitende Welle ein, so stößt sie am verschlossenen auf starren Widerstand, weshalb sich hier ein Knoten bilden muß. Am offenen Ende entsteht aber wie stets ein Schwingungsbauch. Figur 15a zeigt uns die einfachste Schwingungsform einer solchen Röhre. Die Länge L ist in diesem Falle gleich $\frac{1}{4}l$, daher $n = \frac{c}{4L}$, woraus folgt, daß der Grundton einer einseitig „gedeckten" Röhre die tiefere Oktave des Grundtones einer beiderseits offenen von derselben Länge ist. Beim Vorhandensein zweier Knoten (Fig. 15b) ist $L = \frac{3}{4}l$, mit-

Digitized by Google

hin $n = 3 \cdot \frac{c}{4L}$ und die den Abbildungen Figur 15c und 15d entsprechenden Schwingungszahlen sind $n = 5 \cdot \frac{c}{4L}$ beziehungsweise $n = 7 \cdot \frac{c}{4L}$. Man ersieht hieraus, daß die auf einer Seite geschlossene Röhre nur die ungeradzahligen Töne der harmonischen Partialtonreihe zu geben vermag.

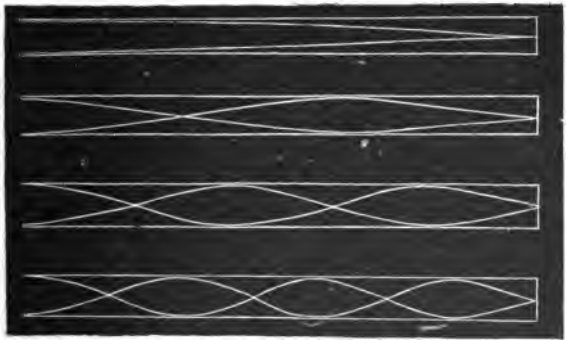


Fig. 15. Stehende Luftschwingungen in einer an einem Ende offenen Röhre. (Nach Jonquière, Musikalische Akustik. Leipzig 1898.)

Daß die Luft in parallelepipedonischen Kasten, in Cylindern, in Hohlkugeln, in beliebigen Flaschen in stehende Schwingungen gerät, wenn von außen her die fortschreitenden Wellen eines mit dem Grundtone oder einem Obertone des abgeschlossenen Luftvolumens unisonen Tones in den Hohlraum gelangen, ist eine Erscheinung, die wir schon in dem Kapitel von der Resonanz kennen lernten. Aber auch für die Musik haben die in röhrenförmigen Hohlkörpern eingeschlossenen Luftsäulen eine

Digitized by Google

erhebliche Bedeutung. Sie bilden die Grundlage zahlreicher Instrumente, bei denen die Binnenluft durch Anblasen in stehende Schwingungen versetzt wird. Die eben erörterte Abhängigkeit der Tonhöhe von der Röhrenlänge gilt dabei in der Praxis freilich nur näherungsweise und auch dies nur, so lange die Länge den Durchmesser ganz beträchtlich — mindestens um das Zwölffache — übertrifft. Ist dies der Fall, so ist es ziemlich gleichgültig, ob die Röhre gerade ist, wie bei den Orgelpfeifen, oder gewunden, wie beispielsweise bei Trompete und Horn; nur scharfe Biegungen müssen vermieden sein. Ob das Instrument aus Holz oder Metall besteht, ist für die Tonhöhe nicht von Belang, hat dagegen Einfluß darauf, wie der Grundton von Obertönen begleitet wird, also auf die Klangfarbe. Die Tonhöhe eines Blasinstrumentes kann abgeändert werden durch Auszüge, durch Ventile, durch Seitenöffnungen, die mit den Fingern oder mit Klappen verschlossen werden, durch teilweises Decken („Stopfen") des offenen Endes mittelst Einführens der Hand und endlich durch die Art des Anblasens. Die ersten drei Mittel zielen auf Verlängerung oder Verkürzung des Rohres ab; bei den Instrumenten mit seitlichen Öffnungen ist die Länge des Rohres jedesmal bis zum ersten unverschlossenen Loche zu rechnen. Das Stopfen vertieft den Ton, insofern dabei die Röhre mehr oder weniger zu einer gedeckten wird. Von der Art des Anblasens hängt es ab, ob der Grundton oder ein Oberton zum Ansprechen gebracht wird.

Die Flöten.

Man kann jeden mit einer engen Öffnung versehenen lufthaltigen Hohlraum zum Tönen bringen, wenn man einen schmalen bandförmigen Luftstrom über die Öffnung

Digitized by Google

hinweggehen läßt. Letztere muß jedoch einigermaßen hervorstehende und scharfe Ränder besitzen. Es genügt zum Beispiel, das Ende eines hohlen Schlüssels oder einer Glasröhre an den Mund zu legen und zwischen den passend geformten Lippen hindurch darüber zu blasen, um einen lauten Ton hervorzubringen. Mit einer Flasche von irgend welcher Gestalt lassen sich in ähnlicher Weise Töne erzeugen, wenn man an ihrer Mündung eine Röhre befestigt, welche am Ende breit geklopft ist, so daß das Lumen einen schmalen Schlitz bildet, und diese dann mit einem Blasebalg in Verbindung setzt. Solche Flaschen, die sich wegen ihrer weichen Klangfarbe gut zu vielen wissenschaftlichen Beobachtungen eignen, hat schon Helmholtz für seine Untersuchungen benutzt, und das Psychologische Institut der Berliner Universität besitzt neuerdings eine auf Anregung von Prof. C. Stumpf gebaute Flaschenorgel, welche mehrere Oktaven umfaßt.

Ein gerades Stück Rohr oder ein hohler Knochen, dessen eines Ende als Mundstück diente, dürfte die Urform der Flöte gewesen sein. Um verschiedene Töne mit einem Instrument erzielen zu können, reihte man mehrere solcher Röhren von ungleicher Länge einfach aneinander. Dadurch entstand die sogenannte Panflöte, deren Erfindung Ovid dem griechischen Gotte Pan zuschreibt. Aber auch Pfeifen mit Seitenlöchern sind seit den ältesten Zeiten in Gebrauch. Ägypter, Indier und Chinesen bedienten sich ihrer so gut wie Griechen und Römer, und auch bei den wilden Völkerstämmen findet man sie.

Da das Blasen auf einem oben und unten offenen Rohre eine gewisse Geschicklichkeit erfordert, so erfand man die sich bequemer spielende Kern- oder Schnabelflöte, bei der das eigentliche Pfeifenrohr durch ein Mundstück, den Schnabel, ganz ebenso angeblasen wird,

Digitized by Google

A. Baßflöte. B. Tenorflöte. C. Altflöte. D. Oktavflöte.

Fig. 16. Blockflöten.

Digitized by Google

wie es bei den gleich zu beschreibenden Labialpfeifen der Orgel geschieht. Die bei uns früher mehr übliche Schnabelflöte war unter dem Namen Flûte douce, Flûte à bec, Bloch- oder Blockflöte bekannt (Fig. 16). Das gegenwärtig noch verwendete Flageolett und die gewöhnliche Kinderflöte sind Blockflöten. Im übrigen hat aber heutigen Tages die Querflöte (Flauto traverso, Flûte allemande), ursprünglich „Schweitzerpfeiff" genannt, die anderen Arten verdrängt.

Die große Querflöte (Fig. 17) wird aus Holz oder Metall mit konischer oder cylindrischer Bohrung verfertigt. Ihre Hauptteile sind das Kopfstück, das Mittelstück und das Fußstück. Am Kopfstücke befindet sich das Mundloch zum Anblasen des Pfeifenrohres, der Stimmzug und die Kork- oder Propfschraube. Letztere wird durch Drehung des knopfartigen Abschlusses am Kopfstücke in Bewegung gesetzt und so der Abstand zwischen Propf und Mundloch variiert. Man kann durch diese Manipulation das ganze Flötenrohr verlängern oder verkürzen, d. h. tiefer oder höher stimmen, zugleich aber auch das Ansprechen der tieferen oder der höheren Töne regulieren. Auch der Stimmzug, dem Auszuge an einem Fernrohre ähnlich, dient dazu, das Rohr zu verlängern oder zu verkürzen. Er befähigt das Instrument, sich beim Zusammenspiel mit anderen deren jeweiliger Stimmung anzupassen. Etwas unterhalb des Kopfstückes beginnt, von oben nach unten sich fortsetzend, die Reihe der Schallöcher, die durch ihre Anordnung und Zahl bei der modernen Flöte einen chromatischen Tonumfang von h^0 bis c^4 ermöglichen.

Zum Zwecke des Anblasens wird das Mundstück mit dem einen Rande gegen die Unterlippe gedrückt, die Oberlippe so gestellt, daß sie mit der Unterlippe einen

Digitized by Google

schmalen Schlitz bildet, und über das Mundloch hinweg geblasen. Ein an einer Öffnung vorbeistreichender Luftstrom wirkt aber saugend, eine Thatsache, auf der ja auch die Wirkung mancher Ventilatoren und anderer Apparate beruht. Es wird daher aus der Querpfeife im Anfange beim Drüberwegblasen die Luft angesogen, bis die Verdünnung im Inneren einen solchen Grad erreicht hat, daß der äußere Luftdruck überwiegt und den bandförmigen Luftstrom, der zwischen den Lippen des Bläsers hindurchtritt, in die Pfeife hineinpreßt. Dann findet in dieser eine Verdichtung statt, der aber alsbald wieder eine Verdünnung folgt. So wechseln Verdichtungen und Verdünnungen ab, wobei das anblasende Luftband wechselweise nach innen und nach außen schwingt. Wegen der Reflexion der Wellen am freien Ende des Flötenrohres bilden sich in demselben stehende Schwingungen und zwar so, daß an dem Mundloche ebenso wie am anderen Ende

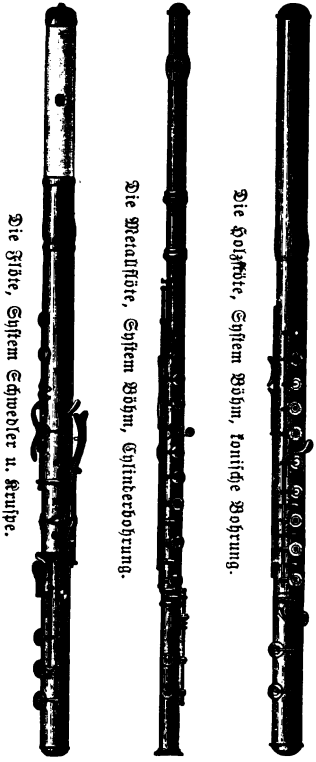


Fig. 17 A. Fig. 17 B. Fig. 17 C.

Digitized by Google

ein Schwingungsbauch entsteht, weil an beiden Stellen die Luftteilchen ungehindert hin und her schwingen können. Die Querflöte gleicht in Bezug hierauf einer Röhre mit zwei offenen Enden. Vollkommen kann sie freilich mit einer solchen nicht übereinstimmen, da das Mundloch wesentlich kleiner ist als der Querschnitt der Bohrung, am oberen Ende also eine teilweise Deckung statthat. Damit hängt es auch zusammen, daß der Schwingungsknoten des tiefsten Tones nicht in die Mitte zwischen Mundloch und unterem Ende fällt, was sich übrigens teilweise durch konische Verjüngung der Bohrung nach unten ausgleichen läßt.

Würde man ein genau cylindrisch gebohrtes, löcherfreies Flötenrohr, dessen Mundloch zugleich dieselbe Weite haben müßte wie die innere Bohrung, auf acht Neuntel seiner Länge verkürzen, so würde der Ton um eine Sekunde steigen. Den nämlichen Erfolg würde man haben, wenn man in acht Neunteln der Länge eine seitliche Öffnung von der Weite der inneren Bohrung anbrächte. Elf solcher Löcher in den durch die Zahlen der gleichschwebenden Temperatur ausgedrückten Abständen vom Mundloche angeordnet und anfänglich durch Klappen gedeckt, dann aber von unten an der Reihe nach geöffnet, würden die Tonleiter bis zur Oktave des Grundtones geben, da mit dem Öffnen irgend einer Klappe die Röhre an dieser Stelle so gut wie abgeschnitten wäre. Nach diesem Prinzip werden auf der Flöte die Töne der tiefsten Oktave, die Grundtöne, erzeugt. Freilich ist ihre Reinheit und Schönheit in Wirklichkeit nicht so einfach zu erreichen wie in der elementaren Theorie. Die relative Enge der Seitenlöcher und andere physikalische Momente sind zu berücksichtigen und lassen sowohl dem Fabrikanten wie dem Bläser noch reichlich Spielraum,

Digitized by Google

seine Kunst zu zeigen. Die höheren Töne, die zweite und dritte Oktave der Flöte, werden durch das sogenannte Überblasen hervorgebracht, wobei der Spieler weniger aber rascheren Wind gibt und zugleich das Mundloch mehr und mehr mit den Lippen deckt. Es teilt sich dabei die tönende Luftsäule im Flötenrohre in die der Tonhöhe entsprechende Zahl für sich schwingender Unterabteilungen. Die meisten höheren Töne kann man auf mehrfache Art angeben. So läßt sich a^2 nicht nur als erster Oberton von a^1 sondern auch als zweiter Oberton von d^1 blasen, und c^4 kann sogar auf fünf verschiedene Weisen gegriffen werden.

Die Grundsätze, die für die Konstruktion der großen Querflöte gelten, sind auch für die kleine, Oktavflöte oder Pickelflöte (Flauto piccolo) genannte, maßgebend. Diese Flöte (Fig. 18) beginnt mit d^1 und hat

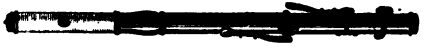


Fig. 18. Pickelflöte.

einen Umfang von zwei Oktaven und einer Quinte. Sie wird vorzugsweise zu Tönen vom zweigestrichenen d an benutzt und ist das höchstliegende Instrument im Orchester.

Die Lippenpfeifen der Orgel.

Die Lippen- oder Labialpfeifen, auch Orgelpfeifen genannt, da sie das hauptsächliche Instrumentarium der Orgel bilden, sind entweder offene (Figur 19 links) oder gedeckte (Figur 19 rechts). Sie bestehen aus einem Fuße a, der auf die Mündung eines Windkastens gesetzt wird und durch den der Anblasestrom in die Luftkammer b eintritt. Diese ist von dem Pfeifenkörper R,

Digitized by Google

der entweder einen rechteckigen oder einen kreisförmigen Querschnitt hat, durch die Bodenplatte desselben, den Kern, abgegrenzt. Unmittelbar oberhalb des Pfeifenfußes ist am Pfeifenkörper seitlich eine meist rechteckige Öffnung angebracht, der Aufschnitt, der mit einem Munde verglichen zu werden pflegt und dessen obere scharfgeschnittene Begrenzung (l) daher Oberlippe heißt, während die untere Begrenzung (m) Unterlippe genannt wird. Die Unterlippe ist vom Kern durch eine feine Spalte, die Kernspalte, getrennt.

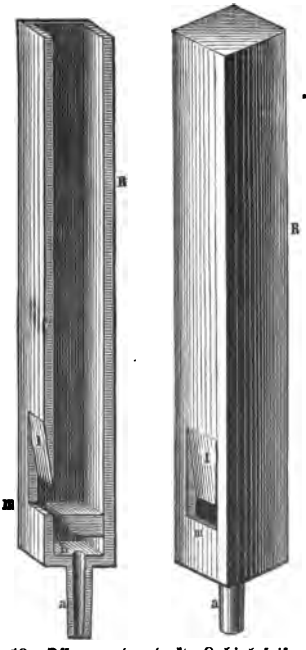


Fig. 19. Offene und gedeckte Labialpfeife.

Das Prinzip der Tonerzeugung ist bei den Labialpfeifen ein ganz ähnliches wie bei der Querpfeife. Der anblasende Luftstrom erhält durch die schmale Kernspalte eine bandförmige Gestalt und stößt bei seinem Ausströmen gegen die scharfe Schneide der Oberlippe. Über dieselbe hinstreichend erregt er im Inneren der Pfeife eine Verdünnung, welche bis zu dem Moment zunimmt, wo die äußere Luft das Übergewicht erhält, in die Pfeife eindringt und, das Luftband nach innen pressend, eine Ver-

Digitized by Google

dichtung hervorruft. Dieser folgt dann wieder eine Verdünnung und so fort. Die Verdichtungen und Verdünnungen schreiten bis zum anderen Ende der Pfeife weiter und werden dort reflektiert: es bilden sich stehende Schwingungen. Ist die Pfeife oben offen, so befindet sich daselbst ein Schwingungsbauch, ist sie gedeckt, ein Schwingungsknoten. Am Aufschnitt haben wir es stets mit einem Schwingungsbauche zu tun. Hier ist die Bewegung der Luft in der Pfeife abwechselnd nach oben und nach unten gerichtet, was auf den Anblasestrom in der Weise zurückwirkt, daß er bald nach innen gesogen, bald nach außen gedrückt wird, also um die Schneide der Oberlippe hin und her schwingt. Der anblasende bandförmige Luftstrom und die Luftbewegung unten in der Pfeife oscillieren gleichsinnig; ersterer unterstützt und unterhält daher die letztere.

Bezüglich der Beziehung zwischen Tonhöhe und Länge der Labialpfeifen sind die früher abgeleiteten Gesetze für die Schwingungen in Röhren mit einem oder zwei offenen Enden maßgebend. Danach wäre die Länge der offenen Pfeife gleich der Halbwellenlänge, die Länge der gedeckten gleich der Viertelwellenlänge ihres Grundtones. Doch gilt dies nur annäherungsweise. Die schwingende Luftsäule reicht nämlich bei den offenen Pfeifen über beide Enden, bei den gedeckten wenigstens über die Öffnung des Aufschnittes hinaus, ist also länger als das Pfeifenrohr selbst, und man hat in dem Ausdrucke für die Schwingungszahl diesen Überschuß zu der Pfeifenlänge hinzuzuzählen. Für eine offene Pfeife wird daher die Schwingungszahl des Grundtones nicht $\frac{c}{2L}$, sondern $\frac{c}{2(L+x)}$ sein, und ebenso ergibt sich für die

Digitized by Google

gedeckte Pfeife $\frac{c}{4(L + x_1)}$ statt $\frac{c}{4L}$. Der Betrag der Größe x ist abhängig von der Weite der Pfeife, insbesondere von deren Tiefe senkrecht zum Aufschnitt, und von der Größe des Aufschnittes selbst, dagegen unabhängig von der Länge der Pfeife. Der Pariser Orgelbauer Cavaillé-Coll hat eine besondere Regel zur Auffindung der „reduzierten" Pfeifenlänge angegeben, auf deren Einzelheiten wir aber hier nicht näher eingehen wollen. Von zwei gleich langen Pfeifen läßt die weitere, oder wie der Kunstausdruck lautet, die weiter mensurierte, einen etwas tieferen Ton hören als die engere. Die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Mensur bewirkt auch, daß eine offene Pfeife, wenn sie gedeckt wird, nicht genau die nächst tiefere Oktave gibt, sondern einen etwas zu hohen Ton, so daß das Intervall der offenen und der gedeckten Pfeife zwischen der Oktave und der großen Septime liegt. Das Verhältnis der höheren Eigentöne zum Grundtone einer Pfeife wird durch die Verschiedenheiten der Mensur nur wenig beeinflußt, wenn die Mensur nicht sehr weit wird.

Da in der Formel für die Schwingungszahl der Töne in Röhren die Fortpflanzungsgeschwindigkeit vorkommt und diese von der Temperatur beeinflußt wird, so hängt auch die Tonhöhe der Orgelpfeifen von der Wärme der Luft ab und zwar nicht unwesentlich. Bei einer Temperatur von 33° C. steht eine Labialpfeife um ungefähr einen (temperierten) Halbton höher als bei 0°, und aus dem Umstande, daß die oberen Luftschichten eines Raumes unter Umständen erheblich wärmer sind als die unteren, erwachsen dem Orgelbauer häufig Schwierigkeiten. Aus diesem und anderen Gründen hat man Mittel gesucht, um den Ton einer Pfeife bei unver-

Digitized by Google

änderter Länge derselben innerhalb gewisser Grenzen zu erhöhen oder zu vertiefen. Zu ersterem Zwecke pflegt man, wo es angeht, den oberen Rand zu erweitern, während eine Verengerung als teilweise Deckung vertiefend wirkt. Eine andere Methode besteht darin, daß man am oberen Rande regulierbare Öffnungen anbringt oder bei gedackten Pfeifen die Deckplatte verschieblich macht.

Auch die Art des Anblasens ist von Einfluß auf die Tonhöhe. Zunächst läßt sich, wie jeder Spieler von Blasinstrumenten weiß, der Ton durch stärkeres Anblasen ein wenig, etwa innerhalb der Grenzen eines Halbtones, in die Höhe „treiben". Steigt aber die Kraft des Anblasestromes beträchtlich, so wird infolge dieses „Überblasens" der nächste Oberton hervorgerufen. Von dem passend bemessenen Windzuflusse hängt also sowohl die richtige Stimmung als auch die Schönheit des Pfeifentones ab. Hier ist der Bläser im Vorteil gegenüber der Orgel. Ihm stehen die verschiedensten und feinsten Nuancen zu Gebote, während die Orgel in dieser Beziehung etwas Starres, Unbiegsames, oft Widerstrebendes hat. Es ist deswegen von jeher beim Orgelbau besondere Aufmerksamkeit auf alle jene Einrichtungen verwendet worden, die dazu dienen, den Wind ohne merkliche Schwankungen des Druckes und in gehöriger Fülle zu den Pfeifen gelangen zu lassen. Jede Pfeife muß auf einen bestimmten Wind intoniert, d. h. so eingerichtet werden, daß sie bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit rein und voll anspricht. Das Messen des Winddruckes geschieht mit der von Förner 1677 eingeführten Windwage, einem sehr einfachen, nach dem Prinzip des Barometers konstruierten Apparate. Das zu verbrauchende Windquantum wechselt sehr mit der Größe und Weite der Pfeifen und schwankt zwischen einigen

Digitized by Google

Kubikzentimetern und 30 oder mehr Litern pro Sekunde. Die den Pfeifen zuströmenden Luftmengen müssen einfach im Verhältnis der Pfeifenlänge stehen. Ein stetiges Crescendo und Descrescendo der Töne läßt sich durch das Anblasen allein bei der Orgel nicht erzielen, man muß sich damit behelfen, die Zahl der gleichzeitig tönenden Pfeifen zu vergrößern oder zu verkleinern. In gewissem Grade kann man aber auch Intensitätsabstufungen durch die Anwendung des Schwellwerkes erreichen. Eine Anzahl von Pfeifenreihen kommen in den sogenannten Schwellkasten, ein geschlossenes Gehäuse, das Türen oder Jalousien besitzt, welche durch eine Tretvorrichtung vom Spieler beliebig weit geöffnet werden können, so daß der Ton mit größerer oder geringerer Mächtigkeit nach außen zu dringen vermag.

Die Pfeifen der Orgel sind für gewöhnlich gegen die Druckluft in den Windräumen durch Ventile abgesperrt. Erst durch das Niederdrücken der Tasten öffnen sich diese und lassen den Wind zu den Pfeifen. Die ältesten deutschen Orgeln enthielten nur elf Tasten für die Töne H, c, d, e, f, g, a, h, c′, d′, e′ (den griechischen Tetrachorden Hypaton, Meson und Diezeugmenon und somit der Tonlage des Männergesanges entsprechend). Die Tasten hatten derartige Dimensionen, daß sie nicht mit den Fingern gespielt werden konnten, sondern mit der Faust geschlagen wurden. Damals bedurfte man ja auch noch nicht der Harmonieverbindungen und begnügte sich mit den einzelnen Tönen zur Leitung und Begleitung des Gesanges. Unsere gegenwärtigen großen Orgeln umfassen die ganze musikalische Tonskala und haben nicht nur mehrere für die Hand bestimmte Klaviaturen, Manuale, sondern auch eine größere oder geringere Anzahl von Pedaltasten. Die Labial- und Zungenpfeifen,

Digitized by Google

deren Gesamtmenge bis in die Tausende gehen kann, zerfallen in diverse Gruppen, die man Register oder Stimmen nennt. Ein Register ist eine Pfeifenreihe, welche in der Regel aus so vielen Pfeifen besteht, als die Klaviatur Tasten zählt, und welche sich von den übrigen Stimmen durch ihre spezifische Klangfarbe unterscheidet. Insofern das Register Pfeifen von verschiedener Tonhöhe aber gleicher Konstruktion und Klangfarbe enthält, stellt es eigentlich ein selbständiges Blasinstrument dar und besteht die Orgel gewissermaßen aus einer Reihe solcher, die nur auf einem gemeinsamen Windraum angeordnet sind.

Die Orgelpfeifen werden teils aus Metall, einer Legierung von Zinn und Blei, teils, wie namentlich die längeren, aus Holz hergestellt. Der Klang der Holzpfeifen ist immer weicher als der der metallenen, nach Helmholtz deswegen, weil die Wandungen der ersteren nicht so gut der Erschütterung durch die Schallwellen widerstehen und die höheren Partialtonschwingungen leichter durch Reibung vernichtet werden dürften. Noch viel wesentlicher ist die Abhängigkeit der Klangfarbe von der Mensur, von der Größe des Aufschnittes, dessen Gestalt man durch verschiedene Form der Umgrenzung oder Anbringung von Seitenklappen (Bärten) mannigfach variieren kann, und von dem Luftzuflusse. Eine weite Mensur der Pfeifen ist der Bildung von Obertönen nicht günstig, während eine enge Mensur dieselbe fördert. Der Klang der enger mensurierten Pfeifen ist folglich unter sonst gleichen Bedingungen heller und schärfer. Eine andere Konsequenz ist die, daß man weitere Pfeifen stärker anblasen kann, ohne daß der Grundton in einen Oberton überschlägt. Da überdies die weiteren Pfeifen schon an sich wegen der größeren Masse der schwingenden

Digitized by Google

Luft lauter klingen, liefern sie die Hauptklangmasse der Orgel, weshalb sie auch Prinzipalstimmen heißen. Bei größeren hölzernen Prinzipalpfeifen fand Helmholtz die Obertöne schon vom zweiten an schwach und undeutlich; engere offene Prinzipalpfeifen ließen noch die ersten sechs Teiltöne ihres Klanges hören. Nach oben kegelförmig verengt sind die Pfeifen aus den Registern Salicional, Gemshorn und Spitzflöte. Bei diesen Pfeifen zeigt sich die Eigentümlichkeit, daß einige höhere Teiltöne, der fünfte bis siebente, verhältnismäßig deutlich hervortreten, worauf Helmholtz die Tatsache zurückführt, daß der Klang leer und zugleich hell ist.

Im allgemeinen wird der Klang einer Pfeife um so obertonreicher und daher schärfer, je niedriger man den Aufschnitt macht. Der Luftstrom trifft dann infolge der geringeren Entfernung die Schneide der Oberlippe mit größerer Kraft und schwingt auch energischer um dieselbe hin und her. Der Wechsel der Bewegung vollzieht sich mit einer ähnlichen Plötzlichkeit, wie es bei den Schwingungen der gestrichenen Saite der Fall ist. Deswegen erinnert auch der Klang gewisser engerer und stark angeblasener Pfeifenregister an den der Streichinstrumente, wie schon aus den Bezeichnungen Geigenprinzipal, Viola di Gamba, Violoncell, Violonbaß hervorgeht.

Die gedackten, cylindrischen Pfeifen zeichnen sich wegen des Fehlens der geradzahligen Teiltöne durch einen hohlen, dumpfen Klangcharakter aus. Sind sie weit, so geben sie übrigens den Grundton fast rein. Engere lassen namentlich noch die Duodezime des Grundtones hervortreten, was zu der Bezeichnung Quintaten Veranlassung gegeben hat. Bei manchen gedackten Registern hat man in den höheren Oktaven Röhrchen in

Digitized by Google

den Deckel der Pfeife eingesetzt, um den Klang heller zu färben. Sie führen den Namen Rohrflöten.

Die Pfeifen der Flötenregister der Orgel werden nach Art der Querflöte angeblasen, haben einen höheren Aufschnitt und erhalten einen schwächeren Luftzufluß als die Prinzipalstimmen, so daß ihr Klang bei vorherrschendem Grundtone und wenig Obertönen einen zarten, flötenähnlichen Charakter annimmt. Einige besitzen in der höheren Lage die doppelte Länge und werden in die Oktave überblasen.

Die Füllstimmen der Orgel sind dazu bestimmt, die natürlichen Obertöne der Prinzipalpfeifen zu verstärken und dadurch den Klang ausdrucksvoller zu machen. Man unterscheidet Quinte, Terz und Septime, von denen die erste den dritten und sechsten, die zweite den fünften, die (seltenere) letzte den siebenten Partialton des Grundklanges verstärkt. Da die Füllstimmen selbst möglichst obertonrein sein müssen, sind die Pfeifen weit mensuriert und teilweise gedackt. Insofern sie nur zur Unterstützung der Grundstimmen dienen, bezeichnet man sie auch als Hilfsstimmen und zwar als einfache im Gegensatze zu den gemischten. Zu den letzteren gehören: Die Mixturen, bestehend aus Oktaven und Quinten, die Kornette, bestehend aus Oktave, Quinte und Terz, die Cymbeln, aus reinen Oktaven bestehend; ferner Tertian, Rauschquinte, Sesquialtera, Scharf u. a. Je nach der Zahl der Pfeifen, welche zu einer Taste gehören, unterscheidet man zwei- bis sechschörige Stimmen.

Aus dem über die Beziehung zwischen den Dimensionen einer Pfeife und der Schwingungszahl ihres Grundtones Mitgeteilten geht schon hervor, daß für die Mensur einer einzelnen Pfeife, wenn es nur auf die Tonhöhe ankommt, kein bestimmtes Maß besteht. Mit

Digitized by Google

einer Pfeife von 324 mm Länge und 34 mm Durchmesser kann man beispielsweise denselben Ton erhalten wie mit einer anderen, welche 355 mm lang ist und einen Durchmesser von 14 mm hat. Der Unterschied betrifft nur die Klangfarbe. Ist aber eine Pfeife von bestimmter Tonhöhe und Mensur und folglich auch von spezifischem Klangcharakter zur Herstellung eines Registers, dessen übrige Pfeifen also dieselbe Klangfarbe haben sollen, gegeben, so müssen die Mensuren aller dieser Pfeifen zu der der ersten in einer gesetzmäßigen Beziehung stehen. Die Auffindung derselben verdanken wir, wie erwähnt zu werden verdient, dem berühmten Organisten J. G. Töpfer. Die genauere Erörterung der Töpferschen Normalmensur muß jedoch der speziellen Lehre von der Orgelbaukunst, die Töpfer durch seine Schriften wesentlich gefördert hat, überlassen bleiben.

Die Zungenpfeifen der Orgel.

Nicht alle Pfeifen der Orgel sind Lippenpfeifen. Die Schnarrwerke oder Rohrwerke bestehen vielmehr

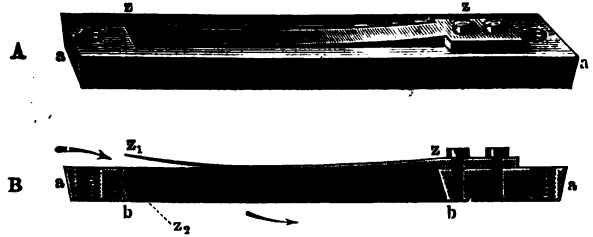


Fig. 20. Durchschlagende Zunge.

aus Zungenpfeifen. Der Hauptbestandteil derselben, eben die Zunge, ist ein länglich-viereckiges Plättchen

Digitized by Google

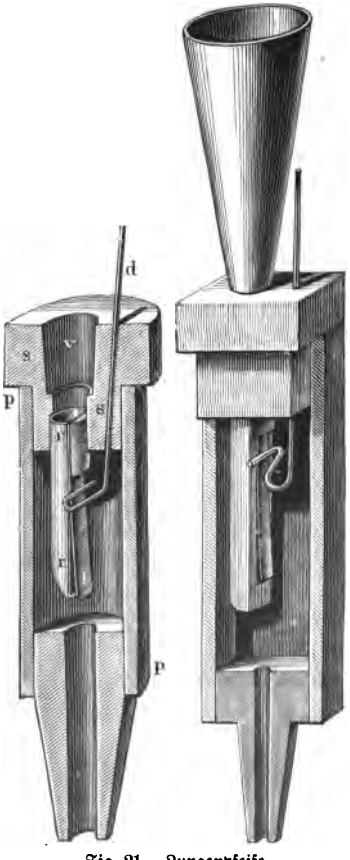


Fig. 21. Zungenpfeife.

(Fig. 20 z) aus Messing oder Argentan, welches mit seinem einen Ende auf einem Rahmen (Fig. 20 aa) befestigt wird. Das andere Ende ist frei, so daß die Zunge hin und her schwingen kann. Unter ihr ist in dem Rahmen ein Schlitz (Fig. 20 bb) angebracht, dessen Dimensionen denen der Zunge entsprechen und zwar entweder so genau, daß die Zunge gerade noch hineinschwingen kann, ohne die Ränder zu berühren (Fig. $20 z^1 z^2$), oder so, daß die Zunge überall die Öffnung überragt und daher bei einer Bewegung gegen den Rahmen hin auf diesen aufschlägt. Im ersteren Falle nennt man die Zunge eine durchschlagende, im letzteren eine aufschlagende. Den Bau einer Zungenpfeife zeigt Figur 21. Der unterste, kegelförmige Teil ist der Fuß, durch dessen Kanal der Wind aus der Windlade

Digitized by Google

in den Stiefel pp eintritt. In dem Kopfe ss ist die Rinne rr (auch Kelle genannt) eingefügt, die die Zunge l trägt. Als Fortsetzung der Rinne wird bei v der Aufsatz, Schallbecher oder Schallkörper eingesetzt. Er hat in unserer Abbildung (rechts) eine konische Gestalt, kann jedoch auch cylindrisch, prismatisch oder anders geformt sein.

In der Ruhe steht die Zunge so, daß sie die Rinne nicht völlig deckt, sondern einen schmalen Spalt frei läßt. In diesen dringt nun, wenn Wind in den Stiefel geblasen wird, ein Strom verdichteter Luft ein, wie die Pfeile in Figur 20 B andeuten. Die Zunge wird dadurch zunächst etwas abgehoben, schwingt dann aber infolge ihrer Elastizität und unter Mitwirkung des zunehmenden Druckes im Stiefel zurück und schließt, entweder durchschlagend oder aufschlagend, die Rinne für einen Moment ab. Im nächsten Augenblick entsteht in der Rinne eine Verdünnung, da die Preßluft in ihr dem Schallbecher zuströmt und gleichzeitig die Zunge, von ihrer Elastizität zurückgetrieben, saugend wirkt. Hat die Zunge ihre natürliche Lage wieder erreicht, so beginnt der Vorgang von neuem. Es wechseln also in der Rinne fortwährend Verdichtungen und Verdünnungen, die die Veranlassung zu einer Klangbildung geben.

Es muß ausdrücklich hervorgehoben werden, daß nicht eigentlich die Schwingungen der Zunge als solche die Ursache des Klanges sind. Denn eine freie Zunge, die man durch Reißen mittelst des Fingers oder nach teilweiser Entfernung des Rahmens durch Streichen mit dem Bogen in Schwingungen versetzt, gibt nur einen ganz schwachen Ton, während eine angeblasene Zunge sehr viel lauter klingt. Der Ton der Zungenpfeife entsteht vielmehr dadurch, daß der an sich kontinuierliche

Digitized by Google

Anblase-Luftstrom durch die Oscillationen der Zunge rhythmisch unterbrochen, in einzelne Stöße zerlegt wird. Er entsteht also in ähnlicher Weise wie der Ton einer Löchersirene, deren einfachste Form Figur 22 zeigt. Eine dünne kreisförmige Scheibe (A) aus Holz, Metall oder Pappe wird mit gleich großen Löchern von gleichem Abstande versehen und mittelst eines Schnurlaufes (fbf)

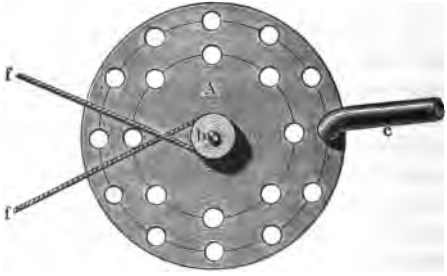


Fig. 22. Seebeckſche Sirene.

vor einer Anblaseröhre (c) gedreht. So oft ein Loch vor letzterer vorüberkommt, dringt die Preßluft aus ihr durch die Scheibe hindurch, während diese in den Pausen die Röhre verschließt. Eine solche Sirene läßt einen Ton (nebst Obertönen) hören, dessen Schwingungszahl gleich der Anzahl der in einer Sekunde erfolgenden einzelnen Luftstöße ist.

Die wesentliche Aufgabe der Zunge in der Zungenpfeife besteht nur darin, daß sie den Rhythmus der Unterbrechungen des Anblasestromes, d. h. die Tonhöhe, bestimmt. Verschiedene Zungen geben natürlich verschieden hohe Töne. Je dicker sie sind, um so rascher schwingen sie, je länger, desto langsamer. Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Schwingungszahl einfach und direkt

Digitized by Google

proportional der Dicke, aber umgekehrt proportional dem Quadrat der Länge. Von der letzteren Tatsache macht man Gebrauch, um den Ton einer Zungenpfeife zu erhöhen oder zu vertiefen. Zu diesem Zwecke ist im Kopfe der Pfeife die sogenannte Stimmkrücke (Fig. 21d) eingesetzt, ein Draht, der sich auf und abschieben läßt und mit seinem unteren gebogenen Ende so fest gegen die Zunge drückt, daß dieser Punkt praktisch als Drehpunkt für die Schwingungen anzusehen ist. Je tiefer der Stimmdraht steht, um so kürzer ist das schwingende Stück der Zunge und um so höher der Ton.

Helmholtz hat die Klangfarbe der Zungenpfeifen genauer studiert. Fehlt das Ansatzrohr, so ist der Klang scharf, schneidend und bei den aufschlagenden Zungen besonders schnarrend. Man hört mit unbewaffnetem Ohre oder mit Hilfe von Resonatoren eine lange Reihe von Obertönen, die noch bis zum sechzehnten oder zwanzigsten deutlich sind. Wie schon früher erwähnt, ist die Zahl der Obertöne um so größer, je diskontinuierlicher die Schallbewegung ist, und in der Tat trifft das auch für die Zungenpfeifen gleichwie für die Sirenen zu, wo die einzelnen Luftstöße während des Verschlusses der Öffnung meist durch vollständige Pausen voneinander getrennt sind. Einen wesentlichen Einfluß auf die Klangfarbe hat der Aufsatz, dessen Dimensionen so gewählt werden, daß er einen Resonator für den Grundton der Zungenpfeife darstellt. Helmholtz setzte einer Messingzunge, wie sie in den Orgeln gebraucht wird und welche den Ton b^0 gab, eine große, ebenfalls auf b^0 gestimmte Resonanzkugel auf und erhielt bei starkem Winddrucke einen vollen, kräftigen und weichen Klang, dem fast alle Obertöne fehlten. Nimmt man andere Ansatzröhren, welche nicht allein den Grundton der Pfeife verstärken,

Digitized by Google

sondern noch mehr Eigentöne haben, so ergeben sich auch zusammengesetztere Klänge. Die Mensur der Zunge, die Art ihrer Befestigung und ihre Stellung zum Anblasestrome trägt zwar ebenfalls zum Charakter der Klangbildung bei, aber in viel höherem Grade kommt es eben auf die Gestalt des Schallkörpers an.

Die Erfindung der Zungenpfeifen oder sogenannten Schnarrwerke der Orgel gehört dem 15. Jahrhundert an. Bis zum Ende des 18. bediente man sich nur der aufschlagenden Zungen, deren scharfer Klang übrigens durch eine leichte Krümmung der Zunge oder Überziehen des Rinnenrahmens mit Leder gemildert werden konnte. Dann erst wurden die durchschlagenden Zungen eingeführt und zwar, wie es heißt, von dem russischen Orgelbauer Kratzenstein, der diese Mechanik einem chinesischen Blasinstrumente, Cheng, entnommen haben soll. Die wichtigsten Zungenregister der Orgel sind Posaune, ausgezeichnet durch einen glänzenden, markigen Baß, Trompete, Oboe, Klarinette und Vox humana. Bei Posaune und Trompete erweitern sich die Aufsätze nach oben trichterförmig, während der zartere Ton von Oboe durch cylindrische, eng mensurierte Schallröhren erreicht wird. Die, die menschliche Stimme nachzuahmen bestimmte, Vox humana hat Schallkörper, die zwecks Dämpfung des Tones mit einem Deckel versehen sind.

Die von dem Schallkörper umschlossene Luftsäule wird ihren Zweck, vom Zungentone in Mitschwingungen versetzt zu werden und ihn dadurch zu verstärken, offenbar am besten erfüllen, wenn sie, für sich angeblasen, den gleichen Ton gibt wie die Zunge. Denn dann gehen bei der gemeinschaftlichen Aktion die Schwingungen der Zunge und die Eigenschwingungen der Luft im

Digitized by Google

Schallkörper stets gleichzeitig und gleichsinnig hin und her und unterstützen sich wechselseitig. Sind aber Röhre und Zunge gegeneinander verstimmt, so werden die Schwingungen beider sich mehr oder weniger hinderlich, und es hängt von den gegebenen Umständen ab, ob die Zunge kraft ihrer Elastizität ihre Schwingungsform zu bewahren imstande ist, oder ob sie durch das Übergewicht der Luftbewegung zu „erzwungenen“ Schwingungen, die sich in einer mehr oder weniger erheblichen Änderung der Tonhöhe äußern, veranlaßt wird.

Auch im Stiefel und in der Windlade werden durch die Schwingungen der Zunge stehende Tonwellen hervorgerufen, die nicht ohne Bedeutung für die übrigen schwingenden Teile sind. Mit der Größe des hier in Frage kommenden Raumes wächst die Fülle und Kraft des Tones. Bei zunehmender Verkleinerung wird dagegen der Ton tiefer und schwächer und spricht zuletzt überhaupt nicht mehr an.

Die Zungen der Mundharmonika, der Handharmonika und ähnlicher Instrumente sind gleich denen des Harmoniums und seiner Abarten durchschlagende ohne Aufsatz, sogenannte freie Zungen. Sie liegen in mehreren Reihen nebeneinander und jede deckt den Ausschnitt einer besonderen Kammer oder Cancelle, in welche der Wind gesondert einströmt. Der Vorläufer des Harmoniums war das Regal, eine kleine tragbare Hausorgel mit nur einem oder wenigen Registern. Das Harmonium unterscheidet sich von dem Regale hauptsächlich dadurch, daß es ein An- und Abschwellen des Tones ermöglicht, weshalb der erste Erfinder, Grenié (1810), es auch orgue expressif nannte. Andere belegten ihre analog konstruierten Instrumente mit anderen Namen, wie Äoline, Physharmonika u. s. w. Die

Digitized by Google

Bezeichnung Harmonium stammt von A. Debain in Paris (1840), dessen patentierte Instrumente zuerst mehrere Register aufwiesen.

Das Harmonium verdankt seine weite Verbreitung nicht nur dem Umstande, daß die Kunst der Fabrikanten den freien Metallzungen Töne von großer Kraft und mannigfachem Kolorit abzugewinnen weiß, und der Möglichkeit eines Crescendo und Decrescendo ohne störende Änderung der Tonhöhe, sondern auch der Unempfindlichkeit gegen Temperaturunterschiede. Die freie Zunge ist in dieser Beziehung so gut wie unverstimmbar, während die Zungenpfeifen der Orgel von den Wärmeschwankungen in ihrer Umgebung wenigstens insofern abhängig sind, als diese die Schwingungen der Zunge durch Druckänderungen der Luft im Schallkörper mittelbar beeinflussen können.

Die Holzblasinstrumente mit Zungen.

Die metallenen Zungen in den Rohrwerken der Orgel und im Harmonium pflegt man als *harte* zu bezeichnen mit Rücksicht darauf, daß sie durch ihre Beschaffenheit die Tonhöhe bestimmen und sich nur unter besonders ungünstigen Bedingungen eine von ihrem Eigentone abweichende Schwingungsform aufzwingen lassen. Die Orchesterinstrumente haben, soweit sie überhaupt mittelst Zungen intoniert werden, *weiche* Zungen. Als ein Extrem dieser Art könnte man den bandförmigen Luftstrom betrachten, mit dem die Querflöte und die Lippenpfeifen angeblasen werden. Er schwingt ja auch wie eine Zunge an der Schneide des Mundloches hin und her und paßt sich dabei hinsichtlich der Frequenz seiner Oscillationen mit vollster Nachgiebigkeit jeder

Digitized by Google

Fig. 23 A.
Klarinette.

Fig. 23 B.
Oboe.

Fig. 23 C.
Fagott.

a) Mundstück der Klarinette.

b) Mundstück der Oboe.

c) Mundstück des Fagottes.

Digitized by Google

Schwingungszahl der stehenden Wellen im Pfeifenrohre an. Ähnlich verhält es sich mit den aus leichtem, elastischem Rohre geschnittenen „Blättchen" der Klarinette, der Oboe und des Fagottes (Fig. 23).

Das Mundstück der Klarinette, die von Denner am Ende des 17. Jahrhunderts erfunden wurde, ist ein schnabelförmig nach vorn zulaufendes Rohr. Die eine Lippe des Schnabels wird von dem Mundstück selbst gebildet und ist völlig starr und unbeweglich. Die andere besteht aus dem mit seinem unteren Ende auf dem Schnabel befestigten Blättchen, das auf der Schnabelöffnung ebenso aufliegt, wie die Zunge auf der Rinne einer Zungenpfeife. Es verjüngt sich nach dem freien Rande hin von etwa 1 mm Dicke bis zu einer ganz feinen Schneide. Das Mundstück der aus der alten Schalmei hervorgegangenen Oboe und des Fagottes setzt sich aus zwei Blättchen zusammen, welche vorn in Form von schwach gewölbten Platten aneinander liegen, an der Basis aber in ein cylindrisches Röhrchen zusammengefügt sind. Dieses steckt in dem vorderen Ende des Blasinstrumentes. Die Platten werden wie der Schnabel der Klarinette zwischen die Lippen genommen und die Atemluft durch den schmalen Spalt getrieben.

Durch das Anblasen geraten die Blättchen in ganz ähnlicher Weise wie die Zungen bei den Zungenpfeifen in Schwingungen und es entwickeln sich in dem Rohre des Blasinstrumentes aus den abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen stehende Wellen, wie wir es schon vom Flötenrohre her kennen. Diesem gegenüber besteht jedoch der Unterschied, daß nicht ein Schwingungsbauch sondern ein Schwingungsknoten an der Stelle gelegen ist, wo der Anblasestrom in das Rohr eintritt. An dem Orte eines Knotens findet aber bekanntlich stärkster

Digitized by Google

Druckwechsel statt, und eben dieser Druckwechsel ist es, der die Zungen veranlaßt, im Tempo der Schwingungszahl des gerade geblasenen Tones hin und her, einwärts und auswärts, zu vibrieren und den erregenden Atemstrom des Bläsers abwechselnd durchzulassen oder abzusperren.

Der Umstand, daß am oberen Ende der Klarinette, der Oboe und des Fagottes immer ein Schwingungsknoten entsteht, hat den Effekt, daß die Tonbildung in diesen Instrumenten wie in gedackten Röhren vor sich geht. Die Klarinette entspricht wegen ihrer cylindrischen Bohrung einer einseitig gedeckten cylindrischen Röhre, weshalb ihr Klang nur aus ungeradzahligen Teiltönen besteht. Oboe und Fagott sind dagegen kegelförmig gebohrt, was, wie Theorie und Versuche übereinstimmend gezeigt haben, zur Folge hat, daß auch die geradzahligen Teiltöne im Klange vorhanden sind.

Der Tonumfang der Klarinette reicht, je nach der Länge des Instrumentes etwas verschieden, von der ungestrichenen Oktave bis in die dreigestrichene. Wie bei der Flöte dienen zur Erzeugung der verschiedenen tieferen Töne Seitenlöcher und werden die höheren Töne durch Überblasen gewonnen. Dasselbe gilt von der Oboe, deren Umfang vom kleinen b oder h chromatisch bis f^3 reicht, und vom Fagott. Das Tonrohr des letzteren ist fast 3 m lang und einmal umgebogen. Sein Tonumfang reicht vom Kontra-B bis zum des^2. Oboe und Fagott geben beim Überblasen als ersten Oberton die Oktave. Man sagt daher, sie „oktavieren", während die Klarinette „quintiert", insofern bei ihr als einer gedeckt-cylindrischen Röhre die erste Überblasung den Ton von der dreifachen Schwingungszahl des Grundtones, also die Quinte der Oktave gibt.

Digitized by Google

Die Tonhöhe der in Rede stehenden Instrumente kann auch bei gleichbleibender Länge des Rohres innerhalb gewisser Grenzen schwanken. Sie wird beeinflußt von der Wärme der schwingenden Luftsäule, von der Länge des Anblaseröhrchens und von der Art, wie dieses mit den Lippen gefaßt wird. Mittelst verschiedener Lippenpressung kann der Bläser den Ton um beiläufig ein Viertel in die Höhe treiben oder sinken lassen. Die Klangfarbe rührt wesentlich von den Anblasevorrichtungen her, obwohl auch die „Stürze", die trichterartige Erweiterung am unteren Ende der Oboen und Klarinetten, zur Fülle der tiefen Töne beiträgt. Der Klarinettenklang wird in den tieferen Tonlagen durch das Aufschlagen des Blattes auf den Schnabel hart, in den höheren Lagen kommt es wegen der kleineren Amplituden der Schwingungen nicht mehr zu einem eigentlichen Aufschlagen. Dagegen ist der Klang der Oboe und des Fagottes infolge des Zusammenschlagens der Doppelblätter stets scharf schwirrend.

Die Blechblasinstrumente.

A. Sachs in Paris hat Instrumente verfertigt, die aus einem konischen Messingrohre mit zahlreichen Klappen bestehen und mittelst eines Klarinettenschnabels angeblasen werden. Der Klang dieser Saxophone ist dem der Klarinette und noch mehr dem des Harmoniums ähnlich. Man pflegt sie ebenso wie die von Sarrus eingeführten Metallinstrumente mit Blättchenzungen mehr zu den Holzblasinstrumenten zu rechnen. Die Saxophone wie die Sarrusophone sind hauptsächlich in Frankreich gebräuchlich. Unter den Blechblasinstrumenten im eigentlichen Sinne verstehen wir Horn, Trompete und Posaune mit ihren Zwischen- und Abarten.

Digitized by Google

Ihre gemeinschaftliche Urform ist eine gerade Röhre, die sich nach dem einen Ende zu trichterförmig erweitert und am anderen Ende ein Mundstück zum Anblasen besitzt. In dieses werden die Lippen hineingedrückt und der Bläser sendet zwischen ihnen hindurch einen Luftstrom in die Röhre. Indem die in letzterer fortschreitende Verdichtung der Luft am anderen Ende reflektiert wird, entwickeln sich stehende Schwingungen, unter deren Einfluß wieder die Lippen des Bläsers in eine vibrierende Bewegung versetzt werden, welche den Anblasestrom abwechselnd durchläßt und absperrt. Die Lippen spielen also hier dieselbe Rolle wie die Zungen bei den vorher besprochenen Instrumenten. Man kann sie mit Helmholtz als schwach elastische, mit vielem wasserhaltigen, unelastischen Gewebe belastete membranöse Zungen betrachten, die infolge ihres geringen Widerstandes leicht durch den wechselnden Druck der schwingenden Luftsäule in Bewegung gesetzt werden. Die Kunst des Bläsers besteht vor allem darin, für jeden Ton den richtigen „Ansatz", d. h. das geeignete Tempo der Lippenschwingungen und somit der zwischen den Lippen hervortretenden Luftstöße, zu finden. Die Form des Mundstückes ist dabei nicht unwesentlich. Für hohe Töne muß die kesselförmige Vertiefung, die zur Aufnahme der Lippen dient, flacher, für tiefe Töne tiefer sein; je weiter andererseits Kessel und Bohrung sind, um so größer wird der Ton.

Hängt auch die Tonhöhe in gewisser Weise von dem Mundstücke ab, so ist doch das für sie Maßgebende die Länge des Rohres, welches außer seinem tiefsten Tone als Grundton dessen sämtliche harmonischen Obertöne zu geben vermag. Man nennt die Reihe dieser Töne die Naturtöne im Gegensatze zu weiteren Tönen,

Digitized by Google

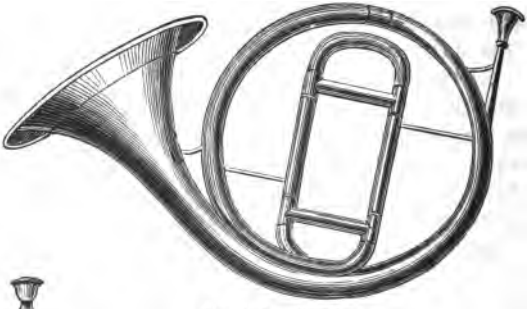


Fig. 24 A. Waldhorn.

Fig. 24 B. Naturtrompete mit Stimmzug.

die man gleichsam künstlich durch besondere, gleich zu erwähnende Mittel der Röhre abgewinnen kann. Die einfach gestreckte Form der Röhre ist nicht gerade bequem im Gebrauche, für tiefere Tonlagen sogar wegen der übermäßigen Länge unmöglich. Man hat daher schon in früher Zeit der Röhre eine gebogene Gestalt gegeben, wobei, wie wir wissen, die Tonhöhe unverändert bleibt. Auf diese einfache Weise entstand unter mannigfachen anderen Typen die Gattung der Naturhörner (Waldhorn; Signalhorn, auch Bugelhorn genannt; Posthorn) und die Naturtrompete (Fig. 24).

Die tieferen Oktaven eines Naturblasinstrumentes sind musikalisch nicht verwertbar, weil sie zu wenig Töne

Digitized by Google

enthalten. Die tiefste wird überhaupt nur durch einen einzigen Ton, den Grundton, repräsentiert und erst in der vierten Oktave ist die Anzahl und das Schwingungszahlenverhältnis der Töne ein derartiges, daß eine diatonische Tonleiter von annähernder Reinheit zustande kommt. Dies wird sofort klar, wenn wir uns erinnern, daß die Schwingungszahlen eines Grundtones und seiner harmonischen Obertöne sich verhalten wie die Reihe der natürlichen Zahlen, den Grundton gleich 1 gesetzt. Ein Naturblasinstrument, als dessen Grundton C_1 angenommen werden möge, würde also folgende Töne geben:

Tiefste Oktave:	$\overset{1}{C_1}$									
Zweite Oktave:	$\overset{2}{C}$	$\overset{3}{G}$								
Dritte Oktave:	$\overset{4}{c}$	$\overset{5}{e}$	$\overset{6}{g}$	$\overset{7}{b}-$						
Vierte Oktave:	$\overset{8}{c^1}$	$\overset{9}{d^1}$	$\overset{10}{e^1}$	$\overset{11}{f^1}+$	$\overset{12}{g^1}$	$\overset{13}{gis^1}+$	$\overset{14}{b^1}-$	$\overset{15}{h^1}$		
Fünfte Oktave:	$\overset{16}{c^2}$	$\overset{17}{cis^2}+$	$\overset{18}{d^2}$	$\overset{19}{dis^2}-$	$\overset{20}{e^2}$	.	.	.	.	.

Wie man sieht, finden sich erst in der dritten Oktave die wichtigsten Töne der C-dur-Tonleiter und erst in der vierten wird die diatonische Leiter vollständig, wenn auch einige Töne, wie durch + oder — angedeutet ist, etwas zu hoch oder zu tief ausfallen. Der Bläser ist mithin darauf angewiesen, die höheren Töne zu benutzen, die wie bei den Holzblasinstrumenten durch Überblasen zum Ansprechen gebracht werden müssen.

Es gibt nun ein relativ einfaches Mittel, um die Entstehung der hohen Töne gegenüber den tiefen zu erleichtern, das ist die enge Mensurierung des Rohres. Je geringer der Durchmesser im Verhältnis zur Länge

Digitized by Google

ist, um so schwieriger ist es für die Luftsäule, in der dem Grundtone entsprechenden großen Länge zu schwingen, und um so leichter lassen sich die höheren Teiltöne blasen. Bei den mit weiter Mensur gebauten Prinzipalstimmen der Orgel spricht, wie wir sahen, der Grundton leicht an und neigt auch bei stärkerem Anblasen nicht zum Überschlagen in die Oktave. Die Mensuren der Holzblasinstrumente sind im Vergleiche zu jenen der Orgelpfeifen, zu denen sie sich durchschnittlich wie 1 : 2,5 bis 1 : 7 verhalten, schon sehr eng, werden aber hierin von den Blechinstrumenten noch erheblich übertroffen. Beispielsweise verhält sich ein Naturhorn in F bei einer Röhrenlänge von rund 3,9 m und einer mittleren Weite von ca. 13 mm zur Mensur einer gleich langen Prinzipalpfeife, deren Weite in der Länge zwanzigmal enthalten ist, wie 1 : 15. Daher kommt es, daß der eigentliche Grundton weder auf dem Naturhorn noch auf der einfachen Trompete brauchbar hervorgebracht werden kann. Allenfalls gelingt es mit den Instrumenten von höherer Stimmlage, bei denen das Mißverhältnis zwischen der Tiefe dieses Tones und der Rohrweite nicht so beträchtlich ist. Wegen seines unruhigen, leicht in die Oktave überspringenden Charakters nannten die alten Trompeter den Grundton „Flattergrob", während sie die nächsten Töne, die Oktave und Duodezime mit Rücksicht auf ihre Schwerfälligkeit und mangelhafte Modulationsfähigkeit als „Grobstimme" und „Faulstimme" bezeichneten.

Die Unreinheit des f^1 und das Fehlen des a^1 in der vierten Oktave der eben mitgeteilten Tabelle vermag man beim Horn durch das Stopfen zu beseitigen, indem man die mehr oder weniger gehöhlte rechte Hand in den Schalltrichter einführt. Diese Manipulation wirkt als

Digitized by Google

teilweise Deckung und vertieft das zu hohe f^1 zu dem richtigen f^1 bezw. das b^1- zu a^1. Ebenso lassen sich natürlich auch die übrigen Töne herabdrücken, so daß durch ihre Erniedrigung um einen Halbton die diatonische Reihe zu einer chromatischen vervollständigt werden kann. Außerdem bietet sich dem Musiker die Möglichkeit, durch kleine Veränderungen im Ansatze den Ton in die Höhe zu treiben oder sinken zu lassen. Er „treibt" den Ton, indem er unter stärkerem Blasen die Lippen mehr spannt und ihnen dichteren Schluß gibt; bei schlafferen, weiter klaffenden Lippen und schwächerem Luftdrucke geht die Tonhöhe herunter.

Die „gestopften" Töne haben eine andere Klangfarbe als die offenen; sie unterscheiden sich auffallend durch ihren matten, gepreßten, dumpfen Charakter von den vollen, klaren Naturtönen. Statt zu viele gestopfte Töne zu verwenden, zieht man es daher vorkommenden Falles vor, die ganze Grundstimmung des Instrumentes zu verändern, was in einfacher Weise durch Aufsatzbögen oder Einsatzbögen geschehen kann, mittelst welcher die Länge des Rohres und folglich die Höhenlage der Naturtöne verändert wird.

Der naheliegende Gedanke, die tieferen Oktaven des Naturhornes und der Naturtrompete durch Anbringung von Seitenlöchern nach Art der Flöten oder der alten Zinken (Holztrompeten mit Tonlöchern) brauchbar zu machen, ist von Kölbel praktisch ausgeführt, der 1770 in Petersburg das Klappenhorn erfand. Weidinger in Wien konstruierte 1801 eine Klappentrompete. Indessen sind diese Formen so gut wie gänzlich wieder verlassen worden, da die Durchbohrungen der Röhre eines Blechinstrumentes den Klang beeinträchtigen und auch noch andere technische Übelstände zur Folge haben.

Digitized by Google

Das einzige auf die Dauer bewährte Mittel zur Vervollständigung beziehungsweise Umstimmung der Naturtonreihe ist die Änderung der Rohrlänge geblieben, mag man dieselbe durch Auf- oder Einsatzstücke oder durch Züge, wie bei der Posaune, bewirken oder die von Stölzel 1814 erfundene Ventilvorrichtung dazu benutzen. Die Ventile — es gibt verschiedene Konstruktionen derselben — sperren, sobald sie mit dem Finger niedergedrückt werden, das Hauptrohr an der betreffenden Stelle ab und zwingen die Tonwellen, ein Seitenrohr zu passieren, ehe sie wieder in das Hauptrohr eintreten. Dieser Umweg kommt einer Verlängerung des letzteren gleich und verursacht daher eine Verminderung der Tonhöhe. Die modernen Instrumente mit Ventilen haben deren in der Regel drei. Mit dem ersten, dem Mundstücke zunächst liegenden, erzielt man eine Vertiefung der Grundstimmung um zwei Halbtöne, mit dem zweiten eine Erniedrigung von einem Halbton und mit dem dritten eine solche von drei Halbtönen. Unter Zuhilfenahme von Kombinationen kann man also den Grundton beliebig um einen, zwei, drei bis sechs Halbtöne tiefer stimmen. Ein Blick auf unsere Tabelle der Naturtöne zeigt aber, daß dies gerade

Fig. 25. Ventilhorn.

Digitized by Google

genügt, um die zwischen den Tönen der zweiten Oktave bestehende Lücke auszufüllen. Denn verwandeln wir successive mittelst der Ventile den dort angenommenen Grundton C_1 in H_2, B_2, A_2, Gis_2, G_2, Fis_2, so erhalten wir entsprechend in der zweiten Oktave statt G der Reihe nach Fis, F, E, Dis, D, Cis. Damit wird das ganze Quinteninterval C — G stufenweise mit Halbtönen ausgefüllt, und da dies in analoger Weise auch für die übrigen Lücken in der Naturtonreihe gilt, so ermöglichen eben die Ventile die Bildung einer kontinuierlichen chromatischen Tonfolge.

Fig. 26. Deutsches Kornett in B.

Es bedarf wohl kaum eines besonderen Hinweises darauf, daß die Erfindung der Ventile ein Fortschritt von fundamentaler Bedeutung für

Digitized by Google

die Blechmusik gewesen ist. Freilich sagt man den Ventilinstrumenten, von deren Haupttypen die Figuren 25—27 Abbildungen geben, nach, daß der die Naturinstrumente

Fig. 27. Ventiltrompeten.

auszeichnende glänzende und kraftvolle Klangcharakter ihnen in viel geringerem Grade eigen sei, aber die technischen Vorzüge der Ventile sind doch so groß, daß die Naturinstrumente dagegen zurückstehen müssen.

Digitized by Google

Gehören die Kornette (Cornets à pistons), die eine gewisse Mittelstellung zwischen Hörnern und Trompeten einnehmen, zu den Ventilinstrumenten, so ist für die Posaune (Fig. 28) die Zugvorrichtung charakteristisch geblieben, wie sie es schon zur Zeit des Agricola und Praetorius im 16. Jahrhundert war. Ventilposaunen gibt es zwar auch, sie werden indessen wegen ihres von dem der Zugposaune abweichenden Klanges in Konzert- und Theaterorchestern wenig benutzt. Eher findet man sie in den Militärmusikkorps. Zur Veränderung der Rohrlänge der Zugposaune dient der bekannte leicht bewegliche, längliche, u-förmige Zug. Durch die erste Zugstellung (Fig. 28, 1. Z.) wird die Skala der Naturtöne um einen Halbton erniedrigt, beim „zweiten Zug" um zwei und so fort bis zum sechsten Zug. Der Effekt ist im Prinzip derselbe, welchen wir eben bei der Erörterung der Ventilfunktion kennen gelernt haben.

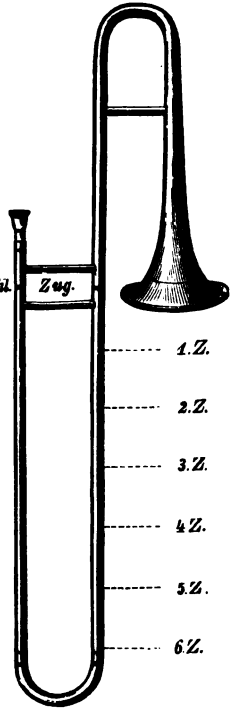


Fig. 28. Posaune.

Der Klang der Posaunen ist prächtig, feierlich, und, wie der der Blechinstrumente überhaupt, voll und glänzend. Daß einzelne Blasinstrumente selbst einer großen Orgel gegenüber sich geltend zu machen vermögen, beruht

Digitized by Google

auf der durch das Material bedingten Klangfarbe und der Art der Tonerzeugung. Werden die Flöten von den Klarinetten und diese wieder von den Oboen übertönt, weil die Schallkraft mit dem Fortschreiten von der relativ schwachen Luftzunge zum einfachen und doppelten Rohrblatt zunimmt, so erfordern die Überblasungen der eng mensurierten Blechröhren den stärksten Grad der Luftpressung. Daher die überlegene Kraft der Trompetentöne. Das Schmetternde des Klanges rührt von dem Einflusse der Stürze auf die Klangfarbe her, der bei den eng mensurierten, mit weiten Schalltrichtern versehenen Hörnern, Trompeten und Posaunen zur Wirkung kommt, während er den konisch verlaufenden Kornetten, Tuben, Bombardons u. s. w. fehlt.

Die menschliche Stimme.

Von allen bisher beschriebenen Instrumenten kommt kaum eines an Fülle des Ausdruckes und an Modulationsfähigkeit der menschlichen Stimme gleich. Wir finden hier ein ähnliches Verhältnis wie zwischen unseren Händen und den zu ihrem Ersatze erfundenen maschinellen Vorrichtungen. Die Maschine arbeitet rascher und exakter, aber ihr fehlt jenes Vermögen, sich allen möglichen abweichenden Anforderungen oder Änderungen der Verhältnisse geschickt anzupassen, welches unseren unmittelbar vom Willen beherrschten Gliedern und Organen in so weitem Umfange zu Gebote steht. Das Stimmorgan ist ein in ganz eigenartiger und, wenn man so sagen darf, genialer Weise aus physikalisch und physiologisch funktionierenden Teilen zusammengesetzter Apparat. Wollte man es mit einem musikalischen Instrumente vergleichen, so käme am ehesten eine Zungenpfeife in Betracht, obwohl nicht un-

Digitized by Google

erhebliche Unterschiede bestehen. Dem Stiefel der Zungenpfeife würde die durch ihre Knorpelringe starrwandig gemachte Luftröhre entsprechen, dem Blasebalge die Lunge. An Stelle der einzigen, höchstens ihrer Länge nach veränderlichen Zunge in der Pfeife befinden sich aber im Kehlkopfe zwei Zungen und zwar membranöse, die (wahren) Stimmbänder, deren Länge, Dicke und Breite wechseln kann. Die Rolle des Schallkörpers vertritt die Mundhöhle, die als ein Resonanzraum von recht variabler Form und Größe wirkt.

Bau des Kehlkopfes.

Um die Funktion der Stimmbänder verständlich zu machen, sind einige Bemerkungen über die Anatomie des Kehlkopfes notwendig. Die Grundlage desselben bildet der oberste, in seiner Form von den übrigen sehr differierende Knorpel der Luftröhre, der Ringknorpel (Cartilago cricoidea), in Figur 29 mit cr bezeichnet. t in Figur 29 ist der durch die Haut des Halses hindurch fühlbare, als Adamsapfel bekannte Schildknorpel (Cartilago thyreoidea), durch dessen obere Hörner Cs der Kehlkopf mit dem Zungenbeine in Verbindung steht, während die unteren Hörner Ci eine Gelenkverbindung mit dem Ringknorpel cr herstellen. Der Höcker Tct und der Vorsprung Ami dienen Muskeln zum Ansatze. Figur 30 zeigt uns das Knorpelgerüst des Kehlkopfes von hinten. Wir sehen den Schildknorpel mit den Hörnern Cs und Ci,

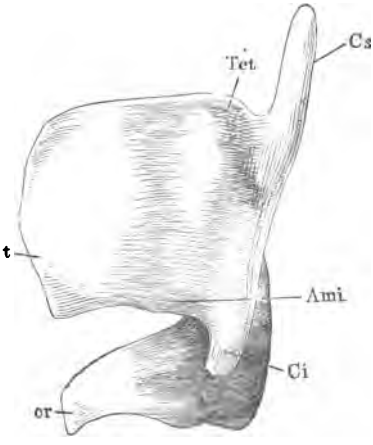


Fig. 29. Knorpeliges Gerüst des Kehlkopfes, von links und außen gesehen.

Digitized by Google

die hintere hohe Platte des Ringknorpels cr und die auf diesem mittelst eines Gelenkes beweglich aufsitzenden Gießbeckenknorpel (Cartilagines arytaenoideae). Die Spitze der letzteren (Fig. 30 co) bilden die Santorinischen Knorpel (Cart. corniculatae). An der mit Pm (Processus muscularis, Muskelvorsprung) bezeichneten Ecke des Gießbeckenknorpels setzen sich Muskelfasern an; Pv ist der in das Lumen des Kehlkopfes vorspringende Stimmfortsatz (Processus vocalis). Die Stelle † ist eine Grube, ** eine Leiste des Knorpels. Der Zwischenraum zwischen der Unterkante des Schildknorpels und der Oberkante des Ringknorpels einerseits und zwischen der oberen Kante des Schildknorpels und dem darüber gelegenen, halbmondförmig gestalteten, die Basis der Zunge repräsentierenden Zungenbeine andererseits ist durch Gelenkbänder, Bindegewebe und Muskeln ausgefüllt. Figur 31 stellt den Kehlkopf und seine Bänder dar und zwar wieder von hinten. Den oberen, bei Oh endigenden Rand bildet das Zungenbein. Auf der inneren Fläche der weichen Gewebsplatte, welche Zungenbein und Schildknorpel verbindet, liegt der Kehldeckel e, dessen oberer Teil sich schützend über den Kehlkopf legt, wenn die Speisen auf dem Wege von der Mundhöhle zur Speiseröhre über denselben hinweggleiten. tr in Fig. 31 ist ein kleines Knorpelchen; he, htl, te, tas, tai, ca, kcps, kcpi sind Bänder; A, Cap″ und Cap′ sind Ansatzstellen von Muskeln, die selbst in der Zeichnung weggelassen sind, um die darunter liegenden Gelenk-

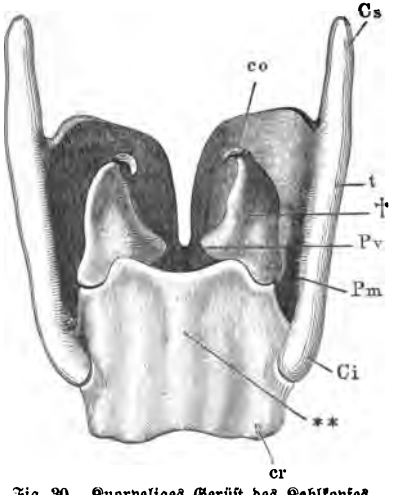


Fig. 30. Knorpeliges Gerüst des Kehlkopfes, von hinten.

Digitized by Google

bänder sichtbar zu machen. Man kann sich diese Muskeln übrigens leicht vergegenwärtigen, wenn man sich die Stelle A mit der korrespondierenden der anderen Seite durch Muskelfasern verbunden denkt und ebenso Cap″ mit Cap′. Der Muskel A ist der Arytaenoideus, der Muskel Cap der Cricoarytaenoideus posticus. Bei einer Zusammenziehung des ersteren drehen sich die Gießbeckenknorpel so, daß ihre Stimmfortsätze sich voneinander entfernen; der letztere zieht, wenn er sich kontrahiert, den Gießbeckenknorpel nach hinten. Rechts wie links spannt sich von der vorderen Fläche des Gießbeckenknorpels in horizontaler Richtung eine prismatische Muskelmasse zur inneren Wand des Schildknorpels hinüber. So entstehen, wie ein Blick auf Figur 32 zeigt, zwei, von den Seitenwänden ins Innere des Kehlkopfes vorspringende, nur eine schmale Spalte zwischen sich lassende Wülste: die, mit elastischem Gewebe durchsetzten, freien Ränder derselben sind die uns hier hauptsächlich interessierenden Stimmbänder (Fig. 32; 5), die genauer als die wahren Stimmbänder bezeichnet werden. Dicht über ihnen wird das Lumen des Kehlkopfes wieder weiter und buchtet sich beiderseits zu der Morgagnischen Tasche aus (Fig. 32; 2, 3), die von oben her eben-

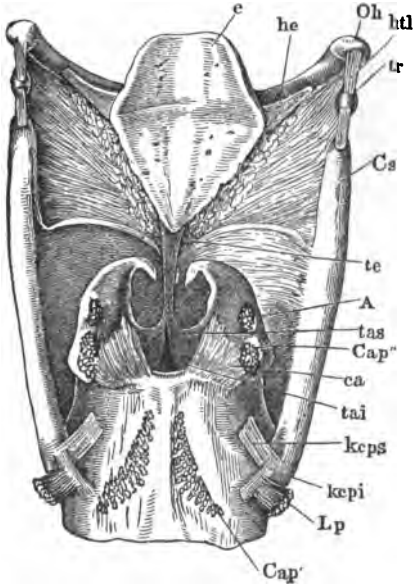


Fig. 31. Kehlkopf von hinten mit Bändern und Muskelansätzen.

Digitized by Google

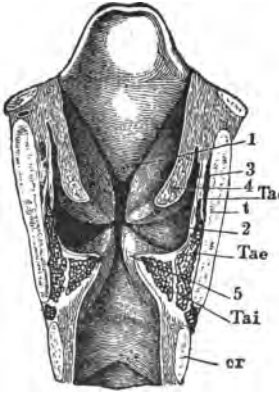


Fig. 32.
Vertikalschnitt durch den Kehlkopf, vordere Hälfte von hinten gesehen.

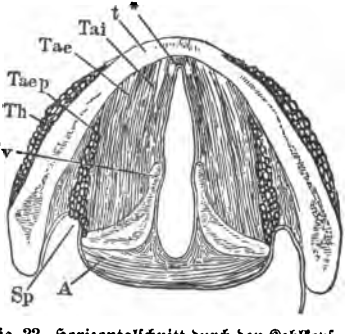


Fig. 33. Horizontalschnitt durch den Kehlkopf.

falls durch einen, aber wesentlich aus elastischem Gewebe bestehenden Wulst begrenzt wird. Die beiden oberen Wülste heißen falsche Stimmbänder (Fig. 32; 4). Oberhalb derselben sieht man in Figur 32 die Epiglottis, den Kehldeckel, der unten (bei 1) einen Wulst aufweist. Die im Querschnitte getroffenen Muskeln Taep, Tae, Tai finden wir wieder in Figur 33, welche uns einen Horizontalschnitt durch den Kehlkopf in der Höhe der Basis der Gießbeckenknorpel veranschaulicht. Das Bild zeigt uns zunächst die enge Spalte zwischen den Stimmbändern, welche vom vorderen Rande (*) bis zu den Stimmfortsätzen (Pv) Stimmritze (Glottis vocalis), von da an bis zum hinteren Ende Atemritze (Glottis respiratoria) heißt. Der in der Figur 33 mit Sp bezeichnete taschenförmige Raum gehört schon mit zur Speiseröhre, in deren Anfangsteil sich der Kehlkopf einbuchtet. Th ist ein äußerer Muskel, A der schon erwähnte Musculus arytaenoideus, der die Stimmfortsätze (Pv) voneinander entfernt, also die Stimmritze erweitert. Die entgegengesetzte Wirkung kommt dem Muskel Tae (Thyreo-arytaenoideus externus) zu, der wie der vorige am Processus muscularis wirkt, aber den Gießbeckenknorpel so dreht, daß die Stimmfort-

Digitized by Google

sätze sich einander nähern. Der Muskel Taep (Thyreo-ary-epiglotticus), in der Zeichnung nur im Querschnitte sichtbar, geht vom Schildknorpel um den Gießbeckenknorpel seiner Seite herum zu dem der anderen Seite. Wirken der Muskel Taep der rechten und linken Körperhälfte zugleich, so werden die beiden Gießbeckenknorpel zusammengeschoben und die Atemritze geschlossen, was in der Regel beim Anblasen der Stimmbänder geschieht. Der Muskel Tai (Thyreo-arytaenoideus internus) zieht den Gießknorpel nach vorn: er verkürzt das Stimmband und entspannt es. Der antagonistische Effekt, Spannung beziehungsweise Verlängerung, ergibt sich, wenn der ebenfalls schon erwähnte Musculus crico-arytaenoideus posticus sich gleichzeitig mit einem an der äußeren, vorderen Seite des Kehlkopfes vom Ringknorpel zum Schildknorpel ziehenden Muskel (Musculus crico-thyreoideus) kontrahiert; dann neigt sich der Gießknorpel nach hinten und der Schildknorpel nach vorn, so daß die Ansatzpunkte des Stimmbandes sich voneinander entfernen, was auf das Stimmband als Zug wirken muß. — Ein mit dem Kehlkopfspiegel am Lebenden aufgenommenes Bild des von oben gesehenen Kehlkopfes gibt (nach Türck) Figur 34 wieder. Fe ist

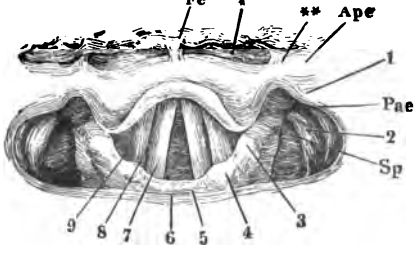


Fig. 34. Kehlkopf, von oben gesehen.

ein Band zwischen Zungengrund und Kehldeckel. Die mit Sternen bezeichneten Stellen sowie Ape, 1, 2, 3 sind Gruben und Wülste der Schleimhautfalten; Sp ist aus Figur 33 bekannt. Die mit Schleimhaut überzogene Cartilago corniculata ist bei 4 als Höcker sichtbar. 5 ist die hintere Wand des Kehlkopfes, 6 diejenige der Speiseröhre. 7 ist das wahre, 9 das falsche Stimmband, 8 der Eingang in die Morgagnische Tasche. Der drei-

Digitized by Google

eckige Raum zwischen den wahren Stimmbändern ist die Stimmritze, durch die hindurch man in die Luftröhre hinabsieht. Ihre in der Zeichnung dargestellte Weite entspricht dem gewöhnlichen Ruhezustande des Kehlkopfes bei geräuschloser, normaler Atmung. Bei der Phonation verengt sich die Stimmritze, bei tiefem Atmen wird sie noch erheblich weiter.

Stimmbildung.

Die Tonbildung im Kehlkopfe geht in ganz ähnlicher Weise vor sich wie in einer Zungenpfeife. Zunächst werden Atemritze und Stimmritze mehr oder weniger vollkommen geschlossen. Dann sprengt die aus der Lunge heraufgepreßte Luft diesen Verschluß, indem sie die Stimmbänder in eine aufwärtsschwingende Bewegung versetzt. Sie nimmt gewissermaßen die Stimmbänder mit nach oben, bis deren elastischer Widerstand das Übergewicht erhält und ein Zurückschwingen veranlaßt, wodurch die Stimmritze wieder geschlossen wird. Darauf wiederholt sich der ganze Vorgang, und diese Wiederholungen folgen einander so rasch und so oft, als es der Höhe und Dauer des Tones entspricht. Die Art, wie die Stimmbänder in Schwingungen geraten, erinnert an die Erregung der Saitenschwingung durch den Bogenstrich. Der Verlauf der Schwingungen ist ein ruckweiser, diskontinuierlicher, und dementsprechend ist auch der gesungene „Ton" nichts weniger als ein physikalisch einfacher Ton. Er ist ein an Teiltönen reicher Klang. Nach Helmholtz kann man mit Hilfe von Resonanzröhren aus tiefen, kräftig gesungenen Baßnoten bei den helleren Vokalen sehr hohe Obertöne bis zum sechzehnten gut heraushören. Die Stärke der Obertöne ist jedoch individuellen Verschiedenheiten unterworfen, je nachdem es sich um eine scharfe, helle oder weiche und dumpfe Stimme handelt. Die normalen Stimmbänder sind

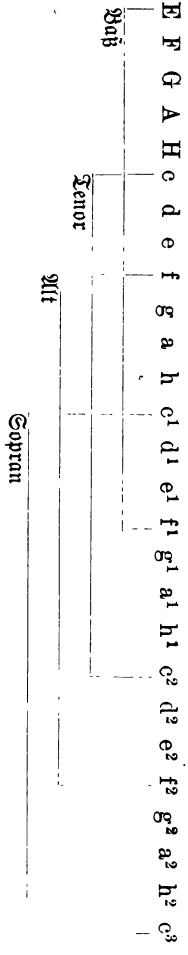
Digitized by Google

durchschlagenden Zungen gleich zu achten. Sie gehen im Moment des Passierens der Ruhelage selbst bei den stärksten Schwingungen so dicht aneinander vorüber, daß sie die Stimmritze schließen, ohne sich dabei zu berühren. Kommt es aus irgend welchen Gründen zum gegenseitigen Aufschlagen, so wird der Klang der Stimme scharf. Die „heisere Stimme" führt Helmholtz auf einen unvollkommenen Schluß der Glottis während der Schwingungen zurück.

Längere Stimmbänder müssen nach den uns bekannten physikalischen Prinzipien unter sonst gleichen Umständen tiefere Töne hervorbringen als kürzere. Die Länge der Stimmbänder beträgt aber bei Männern durchschnittlich 20 mm, bei Frauen 15 mm, bei Kindern 6—8 mm. Daher ist das männliche Geschlecht im allgemeinen durch eine tiefere Stimmlage ausgezeichnet als das weibliche und haben Kinder die höchsten Stimmen. Von individuellen Abweichungen und Zwischenstufen (Bariton, Mezzosopran) abgesehen, kann man vier Haupt-Stimmgattungen unterscheiden, über die das umstehende Schema (nach Johannes Müller) eine Übersicht gibt.

Das einzelne Individuum, mag es nun zu den Bassisten oder Tenoristen, Altistinnen oder Sopranistinnen gehören, umfaßt hiernach mit seiner Stimme rund zwei Oktaven. Es reguliert innerhalb dieses Umfanges die im gegebenen Falle zu produzierende Tonhöhe hauptsächlich durch verschiedene Spannung der Stimmbänder. Johannes Müller, der Altmeister der Physiologie, vermochte bei einem ausgeschnittenen menschlichen Kehlkopfe durch successive von einigen Gramm bis zu einigen hundert Gramm gesteigerte Spannung der Stimmbänder den durch Anblasen erzeugten anfänglichen Ton um mehr als zwei Oktaven zu erhöhen.

Digitized by Google



Läßt man jemanden mit dem tiefsten Tone, dessen er fähig ist, beginnend die Tonleiter bis zu seinem höchsten Tone hinauf singen, so wird man, namentlich bei einem ungeschulten Sänger, bemerken, daß der Charakter des Stimmklanges während einer Reihe von Tönen der gleiche bleibt, daß aber bei einem gewissen Punkte der Skala ein Umschlag erfolgt, von welchem ab der Stimmklang verändert erscheint. Man sagt dann, die Stimme sei in ein anderes Register übergegangen. Die Zahl dieser veränderlichen Einstellungen des Stimmapparates und die Tonhöhe, bei der sie eintreten, ist individuell verschieden. Fast ausnahmslos findet sich indessen wenigstens eine einmalige Teilung zwischen der tieferen und der höheren Partie der Stimme. Es reicht deswegen auch aus, nur zwei Register zu unterscheiden: Bruststimme und Kopfstimme (Fistelstimme, Falsettstimme). Erstere ist die normale Stimmart, die zugleich am wenigsten anstrengt. Sie hat ihren Namen deswegen, weil bei ihrer Anwendung der Luftinhalt der Lunge stark resoniert und dies an einem fühlbaren Schwirren der

Digitized by Google

Brustwand erkennbar ist, was zu der laienhaften Auffassung, die Töne kämen aus der Brust, Veranlassung gegeben hat. Die Falsettstimme, durch diesen Namen als „falsches", künstliches Register charakterisiert, ist mit größerer Anstrengung verbunden. Die Töne haben dabei wegen der überwiegenden Resonanz des Ansatzrohres scheinbar ihren Ursprung im Kopfe, daher Kopfstimme. Eine Anzahl mittlerer Töne lassen sich sowohl mit Brust- als auch mit Fistelstimme singen. Die Grenzen so ineinander überzuführen, daß der Übergang von einem Register zum anderen unmerklich und eine Ausgleichung der Stimme in ihrem ganzen Umfange erzielt wird, ist die eigentliche und bedeutsamste Aufgabe des Gesangsunterrichts.

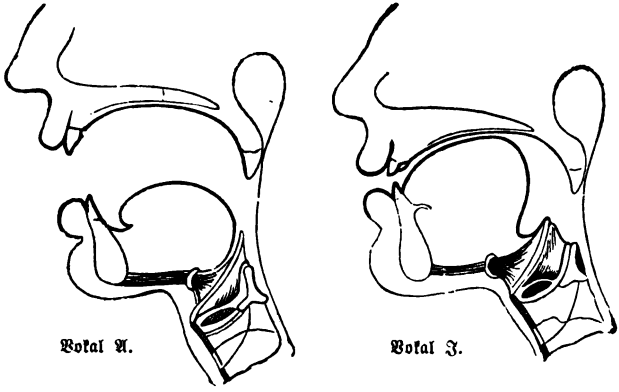
Hinsichtlich der Gestalt des Kehlkopfes und der Tätigkeit seiner Teile bei der Intonation der den verschiedenen Registern angehörenden Tonreihen sind die Beobachter noch nicht zu hinreichender Einigkeit gelangt, doch wird die folgende Darstellung wohl im ganzen das Richtige treffen. Bei den tiefsten Tönen ist die Stimmritze nicht völlig geschlossen; die Stimmbänder klaffen vielmehr ihrer ganzen Länge nach auseinander. Sie sind relativ wenig gespannt und schwingen in ihrer vollen Länge und Breite, wobei auch die massige Partie der Wülste teilnimmt. Je höher die Töne werden, um so mehr schließt sich die Glottis und um so stärker wird (durch die Aktion der Muskeln Crico-thyreoidei und Crico-arytaenoidei postici) die Spannung der Stimmbänder. Ein weiteres Mittel zur Tonerhöhung ist die Zunahme der Stärke des Anblasestromes. Soll ein und derselbe Ton von piano auf forte getrieben werden, so muß zur Kompensation der durch das stärkere Anblasen bewirkten Erhöhung eine vertiefende Wirkung der Kehl-

Digitized by Google

kopfmuskeln eintreten; andererseits können die höchsten Töne, wenigstens mit der Brustst imme, nur forte angegeben werden. Beim Übergang zur Kopfstimme schließt sich das hintere Ende der Stimmritze so fest, daß nur noch der vordere Teil der Bänder für die Schwingungen in Anspruch genommen wird. Infolge dieser Verkürzung steigt die Tonhöhe, trotzdem die Spannung wieder geringer wird. Als tonerhöhend kommt hier ferner in Betracht, daß nicht mehr die ganzen Stimmbandmassen, sondern nur noch die freien elastischen Ränder schwingen. Die drei Momente: zunehmende Verkürzung, zunehmende Verschmälerung — schließlich sollen sich die falschen Stimmbänder vollständig auf die wahren herabsenken und nur einen ganz schmalen schwingungsfähigen Rand übrig lassen — und allmählich wieder zunehmende Spannung sind es, die es möglich machen, daß noch eine ganze Reihe von Tönen mittelst der Kopfstimme produziert werden können. Was die Stärke des Luftstromes anlangt, so ist diese geringer bei der Kopfstimme als bei der Brustst imme. — Daß der ganze Kehlkopf beim Singen um so mehr aufwärts steigt, je höher die Töne sind, ist bekannt. Man kann diese Bewegung aufs deutlichste konstatieren, wenn man während des Singens den Finger auf den Adamsapfel legt. Sie hat jedoch auf die eigentliche Tonbildung kaum einen Einfluß und dürfte vielmehr lediglich im Interesse günstigster Resonanz erfolgen.

Der Aufsatz der Zungenpfeifen pflegt so konstruiert zu sein, daß er zunächst den Grundton des Klanges und außerdem noch eine gewisse Anzahl der harmonischen Obertöne verstärkt. Es kann aber auch der Fall vorkommen, daß der tiefste Eigenton des Ansatzrohres nicht dem Grundtone sondern einem der Obertöne entspricht,

Digitized by Google



und dann wird auch dieser Oberton am meisten aus dem Klangganzen herausgehoben. Der Klang bekommt dadurch einen besonderen Charakter, er wird nämlich einem der Vokale der menschlichen Stimme mehr oder weniger ähnlich. Die Tatsache, daß kein freier Gesangston unser Stimmorgan verläßt, ohne von einem unserer Vokale begleitet zu werden, hat ihren Grund darin, daß die Töne der Kehle eben Töne membranöser Zungen sind, deren Ansatzrohr, die Mundhöhle, je nach Wahl des

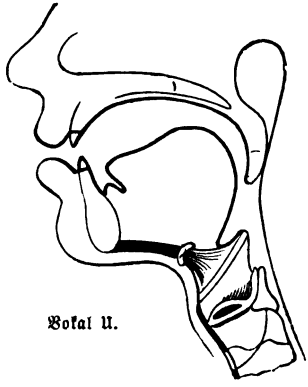


Fig. 35. Stellung der Mundhöhle bei der Vokalbildung. (Nach Grützner.)

Digitized by Google

Sängers durch verschiedene Weite, Länge und Stimmung bald diese, bald jene Obertöne verstärkt. Je nachdem die Mundhöhle die eine oder die andere der in Figur 35 wiedergegebenen Formen annimmt, erhält der gesungene Ton das Timbre des Vokales A, J oder U, weil in jedem Falle andere Partialtöne des Klanges hervortreten. Man hat daher die Vokale als Klänge zu betrachten, welche sich durch die Intensitätsverhältnisse ihrer Teiltöne unterscheiden. Die Richtigkeit dieser allgemeinen Definition läßt sich übereinstimmend durch die verschiedenen Methoden der Vokalanalyse und der künstlichen Synthese von Vokalen erweisen. Im einzelnen gehen aber die Ansichten der Autoren über die Bildung der Vokale noch immer ziemlich weit auseinander, weshalb auch an dieser Stelle auf detaillierte Erörterungen verzichtet werden muß.

Digitized by Google

Die Töne in musikalischer Beziehung.

Von jeher diente wilden wie zivilisierten Völkern zum Ausdrucke ihrer religiösen Gefühle oder festlichen Stimmungen der Gesang, und aus ihm hat sich auch, in freilich sehr langsamem Fortschritte, unsere Musik entwickelt, die einzige Kunst, welche in der Natur kein eigentliches Vorbild gehabt hat.

Die Töne der menschlichen Stimme und aller Instrumente überhaupt bilden an sich ein Kontinuum, d. h. sie verlaufen vom tiefsten bis zum höchsten so, daß man sich zwischen je zweien immer noch einen mittleren denken kann, wie nahe sie sich auch schon liegen mögen. Wenn man eine Sirene schneller und schneller laufen läßt oder wenn der Finger auf der Violinsaite in die Höhe gleitet, so haben wir Tonveränderungen, welche dieser Beschaffenheit des Tonreiches entsprechen. In der Musik sind indessen bestimmte feste Stufen im Gebrauche, und gerade darin unterscheidet sie sich von jeder nicht musikalischen Verwendung der Töne, auch von dem Tonfalle der Sprache. Zwar kann man in letzterer mehr oder weniger regelmäßig wiederkehrende Abstufungen der Tonhöhe bemerken, aber dieselben sind doch von der Konstanz und Genauigkeit, wie wir sie in der Musik fordern, weit entfernt. Schon im ersten Abschnitte dieses

Digitized by Google

Buches wurde darauf hingewiesen, daß nicht alle Töne einer von irgend welchem Anfangstone aus gebildeten physiologischen Tonreihe in beliebiger Weise zu einer melodischen Tonfolge oder einem harmonischen Zusammenklange brauchbar sind. Das natürliche musikalische Gefühl gestattet keine Regellosigkeit in dieser Hinsicht, sondern verlangt die Wahl solcher Töne, die unter sich beziehungsweise zum Ausgangstone in gewissen einfachen Verhältnissen stehen. Die Erklärung hierfür kann nur eine psychologische sein. Sie soll den Gegenstand des Folgenden bilden.

Konsonanz, Dissonanz und Tonverwandtschaft.

Seitdem es Musik gibt, spielen gewisse Intervalle eine ausgezeichnete Rolle, und seitdem es eine Musiktheorie gibt, hat man Rangordnungen der Intervalle aufgestellt. In der griechischen Musiklehre, welche in der Schule der Pythagoreer ihren Ursprung nahm, wahrscheinlich aber selbst auf ägyptische Einflüsse zurückgeht, wurden die „zusammenklingenden" (symphonischen = konsonanten) von den „auseinanderklingenden" (diaphonischen = dissonanten) Intervallen geschieden und zu den ersteren die Oktave, Quinte und Quarte gerechnet, zu den letzteren alle übrigen, auch die Terzen. Die Konsonanz wurde von den meisten Schriftstellern als „Verschmelzung (Krasis) zweier gleichzeitig erklingenden Töne" definiert. Am stärksten fand man diese Verschmelzung bei der Oktave; sie wurde demgemäß als die vollkommenste Konsonanz bezeichnet.

Später haben sich die Anschauungen über die Grade wie über das Wesen der Konsonanz mehrfach verschoben. Am Ende des 12. Jahrhunderts hat einer der ersten Lehrer auf dem Gebiete unserer heutigen Musik, Franco von Köln, nachstehendes Einteilungsschema aufgestellt:

Digitized by Google

Konsonanzen

Vollkommene	Mittlere	Unvollkommene
Einklang	Quinte	Große Terz
Oktave	Quarte	Kleine Terz

Dissonanzen

Unvollkommene	Vollkommene
Kleine Sexte	Sekunde
Große Sexte	Septime

Im 13. und 14. Jahrhundert fing man an, auch die Sexten unter die Konsonanzen zu rechnen, während bezüglich der Konsonanz oder Dissonanz der Quarte ein Streit entstand, der sich bis in die neueste Zeit hinein fortgesetzt hat. Die dem gegenwärtigen allgemeinen Urteile am besten entsprechende Stufenfolge der Konsonanzen dürfte diese sein: Oktave, Quinte und Quarte, große Terz und große Sexte, kleine Terz und kleine Sexte.

Die älteren Lehren und die Theorie von Helmholtz.

Beachtet man, daß das Schwingungszahlenverhältnis der Oktave 1 : 2, der Quinte 2 : 3, der Quarte 3 : 4, der großen Terz 4 : 5 ist, so fällt auf, daß der Grad der Konsonanz gleichmäßig mit der Einfachheit dieser Relationen abnimmt. Es ist öfter, auch in neuerer Zeit wieder, unternommen worden, hierauf eine Erklärung der Konsonanz zu gründen und zwar durch Annahmen wie die, daß die Seele ein größeres Wohlgefallen an einfachen als an komplizierteren arithmetischen Beziehungen der Töne zu einander habe. Allein die Konsequenzen

Digitized by Google

solcher Hypothesen führen zu Widersprüchen mit verschiedenen Erfahrungen und Überlegungen, und ihre Wurzeln verlieren sich in dem unfruchtbaren Boden metaphysischer Spekulationen. Es ist ebenso unrichtig, Konsonanz mit Annehmlichkeit und Dissonanz mit Unannehmlichkeit zu identifizieren, wie es unstatthaft ist, das Auflösungsbedürfnis als dasjenige Merkmal anzusehen, durch welches Konsonanz und Dissonanz sich unterscheiden.

Rationeller, weil an positive physiologische Tatsachen anknüpfend, waren die Versuche von Sauveur (1700), Sorge (1747) und anderen, die Dissonanz mit den Schwebungen in Zusammenhang zu bringen, und Betrachtungen, wie sie Rameau und d'Alembert (1762) über die aus der Existenz der Obertöne herzuleitende „Natürlichkeit" des Dur- und Molldreiklanges anstellten. Helmholtz hat die Prinzipien dieser älteren Lehren in vervollkommneter Durcharbeitung seiner eigenen Definition der Konsonanz und Dissonanz zu Grunde gelegt, welche die lebhafteste Anerkennung gefunden hat und noch jetzt vielfach in den beteiligten Kreisen als maßgebend hingestellt wird, obwohl sie nie ganz ohne Widerspruch geblieben ist und namentlich die neueren Publikationen Stumpfs ihre Schwächen, ja ihre Unhaltbarkeit erwiesen haben.

Die von Helmholtz gegebene Hauptdefinition lautet: „Konsonanz ist eine kontinuierliche, Dissonanz eine intermittierende Tonempfindung."

Der zweite Teil dieses Satzes bezieht sich auf die Schwebungen, und der durch dieselben bedingte Grad der Rauhigkeit soll es sein, der den Grad der Dissonanz bestimmt. Daß zahlreiche Dissonanzen zusammen mit Schwebungen vorkommen und daß Schwebungen von

Digitized by Google

Einfluß auf die Annehmlichkeit oder Unannehmlichkeit eines Klanges sind, ist gewiß richtig. Aber andererseits gibt es auch Intermittenzen ohne Dissonanz und Dissonanz ohne Schwebungen, wofür Stumpf eine Reihe von Belegen beigebracht hat. Ferner ist zu bedenken, daß streng genommen nach Helmholtz ein und dasselbe Intervall in verschiedenen Oktaven einen verschiedenen Grad von Konsonanz oder Dissonanz besitzen müßte. So müßte beispielsweise die Terz c—e in der kleinen Oktave wegen ihrer 33 Schwebungen als ebenso ausgesprochene Dissonanz empfunden werden wie etwa das Intervall $d^1—e^1$ und letzteres wiederum, in immer höhere Oktaven versetzt, infolge der abnehmenden Merklichkeit der Schwebungen jedesmal weniger dissonant erscheinen. Beides widerspricht den Tatsachen der Beobachtung, und man wird daher aus allen diesen Gründen die Helmholtzsche Definition, wenigstens in der obigen Form, nicht aufrecht erhalten können.

Zudem paßt diese Definition nur auf gleichzeitige Töne, da bei bloß melodischer Folge die Schwebungen fortfallen. Helmholtz führt hier den Begriff der Klangverwandtschaft ein, und zwar deckt sich die „direkte Verwandtschaft“ der Töne mit der Konsonanz, während dissonante Töne nur indirekt verwandt sein können. Zwei Grundtöne sind um so näher verwandt, je mehr und je kräftigere Teiltöne ihnen gemeinschaftlich sind. Von den Teiltönen vernimmt zwar das gewöhnliche Gehör nichts, aber das ist auch nicht nötig, da der Eindruck der Verwandtschaft sich dem Hörer unmittelbar als Ähnlichkeit der Klänge aufdrängt, gleichwie wir „oft die Ähnlichkeit der Gesichter zweier naher Verwandter anerkennen, während wir selten genug imstande sind anzugeben, worauf diese Ähnlichkeit beruht.“

Digitized by Google

Am meisten gemeinschaftliche Teiltöne haben zwei Klänge, deren Grundtöne im Oktavenverhältnisse zu einander stehen. Hier fallen sämtliche Teiltöne des höheren Klanges mit Teiltönen des tieferen zusammen, und es sind weder Schwebungen von Obertönen noch Schwebungen von Kombinationstönen möglich, die dem Gesamtklange auch nur eine Spur von Rauhigkeit, also Dissonanz, verleihen könnten. Wegen dieser absoluten Glätte ist das Intervall der Oktave eben eine „absolute Konsonanz". Bei der Quinte ist sowohl die Verwandtschaft als auch die Konsonanz schon geringer. Ist die Schwingungszahl des tieferen Tones $2 \cdot n$, so ist die des höheren $3 \cdot n$ und die Doppelreihe der Obertöne die folgende:

Grundklang:	$2 \cdot n$	$4 \cdot n$	$6 \cdot n$	$8 \cdot n$	$10 \cdot n$	$12 \cdot n$ .....
Quinte:		$3 \cdot n$	$6 \cdot n$	$9 \cdot n$		$12 \cdot n$ .....

Wie man sieht, kommen nur noch einige gleiche Obertöne in beiden Klängen vor, während andererseits die Töne $8 \cdot n$, $9 \cdot n$ und $10 \cdot n$, wenn sie hinreichend stark sind, Schwebungen verursachen können. Würden wir ein analoges Teiltöneschema für die übrigen Intervalle aufstellen, so würden wir finden, daß in der Reihenfolge Quarte, große Terz, kleine Terz die Verwandtschaft weiter abnimmt und die Gelegenheit zur Entstehung von Oberton- oder Kombinationstonschwebungen wächst. Verwandtschaft und Konsonanzgrad verringern sich also stufenweise gleichzeitig, weshalb man auch kurz sagen könnte: Konsonanz ist die durch gemeinschaftliche Obertöne gegebene Ähnlichkeit zweier Grundtöne, Dissonanz der Mangel oder relativ geringe Grad einer solchen. Insofern jedoch diese Formulierung die Obertöne heranzieht, macht sie die Konsonanz oder Dissonanz eines Intervalles wieder abhängig von seiner Höhenlage und von der Klang-

Digitized by Google

farbe, weil mit diesen beiden Faktoren die Verhältnisse der Obertöne sich ändern, und kommt dadurch in Konflikt mit der Tatsache, daß zwar die Klangfarbe eines Intervalles mannigfach wechseln kann, der Konsonanzgrad aber konstant ist.

Die Theorie von Stumpf.

In Übereinstimmung mit Helmholtz geht Stumpf davon aus, daß der Unterschied konsonanter und dissonanter Klänge in den Tonempfindungen als solchen liegen muß, aber er findet ihn nicht in den begleitenden Obertönen oder Schwebungen, sondern in den Grundtönen des Zweiklanges selbst und zwar in ihrer größeren oder geringeren Verschmelzung.

Verschmelzung ist „dasjenige Verhältnis zweier Empfindungsinhalte, wonach sie nicht eine bloße Summe sondern ein Ganzes bilden. Die Folge dieses Verhältnisses ist, daß mit höherer Stufe desselben der Gesamteindruck sich unter sonst gleichen Umständen immer mehr dem einer Empfindung nähert und immer schwerer analysiert wird." Aus zahlreichen Beobachtungen hat sich ergeben, daß der Grad der Verschmelzung mit demjenigen der Konsonanz parallel verläuft. Die Stufenfolge der Verschmelzung ist nämlich diese: Oktave, Quinte, Quarte, natürliche Terzen und Sexten, zwischen denen keine deutlichen Verschmelzungsunterschiede zu konstatieren sind; den Schluß bilden alle übrigen Tonverbindungen, welche sämtlich den geringsten Verschmelzungsgrad zeigen. Weitere Eigentümlichkeiten der Verschmelzung, die auch durchweg der Konsonanz zukommen, sind die folgenden. Der Verschmelzungsgrad ist unabhängig von der Höhenlage des Intervalles, wenn man von den Grenzregionen des Tonreiches absieht, wo die Verschmelzungsunterschiede gleich allen anderen Quali-

Digitized by Google

täten der Tonempfindung undeutlich werden; auch auf die absolute und relative Stärke der beiden verschmelzenden Töne kommt es nicht an; bei der Erweiterung eines Intervalles um eine oder mehrere Oktaven wiederholen sich dieselben Verschmelzungsgrade (Erweiterungsgesetz); die Verschmelzung ist auch bloß vorgestellten Tönen eigen; ganz geringe Verstimmungen stören den Eindruck der Verschmelzung nicht, während größere Abweichungen von der Reinheit den Verschmelzungsgrad alsbald auf die niedrigste Stufe herabdrücken.

Diese Tatsachen der Verschmelzung bedürfen natürlich ihrerseits wieder einer Erklärung, und zwar ist dieselbe auf physiologischem Gebiete zu suchen, da die Verschmelzung in psychologischer Beziehung als ein nicht weiter abzuleitendes Grundverhältnis zu betrachten ist. „Wir haben anzunehmen, daß beim gleichzeitigen Erklingen (oder bloßen Vorstellen) zweier Töne, die ein relativ einfaches Schwingungsverhältnis zu einander haben, im Gehirn zwei Prozesse stattfinden, die in einer engeren Verknüpfung miteinander stehen, als wenn weniger einfache Schwingungsverhältnisse vorliegen." Diese besondere Verknüpfungsform bezeichnet Stumpf als spezifische Synergie, ohne indessen auf die hier etwa in Betracht kommenden physiologischen Zustände und Vorgänge näher einzugehen, da sich hierüber, wenigstens bei dem gegenwärtigen Stande der Gehirnphysiologie, doch nur mehr oder weniger vage Hypothesen aufstellen lassen würden.

Die Verschmelzung zweier Töne zu einem einheitlichen Ganzen setzt notwendig ihre Gleichzeitigkeit voraus, aber diese braucht keineswegs objektiv zu sein. Für das Eintreten der spezifischen Synergie kommt es vielmehr nur auf die subjektive, psycho-physiologische Gleichzeitigkeit an, die nicht bloß beim unmittelbaren Zusammenklange

Digitized by Google

der Töne besteht, sondern auch bei der melodischen Aufeinanderfolge, insofern hierbei der vorhergehende Ton noch klar und lebendig in unserem Bewußtsein ist, wenn die Empfindung des zweiten eintritt. Es ist ja eine der fundamentalsten psychologischen Tatsachen, daß jeder Empfindungsinhalt, nachdem die Empfindung selbst vorüber ist, noch eine Zeitlang im Bewußtsein bleibt und zwar zuerst sehr deutlich, später mehr und mehr verblassend. Mit Rücksicht hierauf erklärt sich die Konsonanz und Dissonanz aufeinander folgender Töne nach der Verschmelzungstheorie in einfacher Weise dadurch, daß die Empfindung des folgenden Tones mit dem noch frischen Erinnerungsbilde des vorhergehenden je nach Art des Intervalles mehr oder weniger innig verschmilzt; eine Annahme, die um so weniger Schwierigkeiten begegnet, als Verschmelzungen, wie bereits erwähnt wurde, ohnehin auch bei bloß vorgestellten Tönen stattfinden.

Bedarf die Definition der Konsonanz durch die Verschmelzung an sich keiner Ergänzung, so reicht doch der Verschmelzungsbegriff allein nicht hin, die Struktur und die Leistungen des musikalischen Bewußtseins begreiflich zu machen. So kann man fragen: „Wenn unter den Terzen und Sexten, ebenso unter den großen und kleinen Terzen keine deutlichen Verschmelzungsunterschiede bestehen, was unterscheidet diese Tonstufen noch in unserem Bewußtsein?“ Hier ist zu berücksichtigen, daß die erwähnten Intervalle innerhalb der gleichen Verschmelzungsstufe von einem bestimmten Ausgangstone gerechnet in bestimmter Richtung ungleiche Abstände repräsentieren. Stumpf nennt den Abstand der Intervalltöne, bezogen auf einen bestimmten Ausgangston und eine bestimmte Richtung, kurz den relativen Abstand. Eine andere Frage ist diese: „Wenn unter der letzten Verschmelzungs-

Digitized by Google

stufe keine erheblichen Verschmelzungsunterschiede bestehen, wodurch unterscheiden sich die musikalisch brauchbaren Dissonanzen von den bloßen Verstimmungen und wodurch die schärferen von den weniger scharfen Dissonanzen?" Ihre Beantwortung führt zum Begriffe der Tonverwandtschaft. Während Helmholtz wegen der Heranziehung der Obertöne genötigt war, eine Klangverwandtschaft zu postulieren, bietet die Verschmelzungstheorie die Möglichkeit, schon bei einfachen Tönen von Verwandtschaft zu reden. Der Begriff schließt sich ohne weiteres an den der Konsonanz an. Stumpf erklärt für direkt verwandt oder verwandt im ersten Grade zwei Töne, welche untereinander konsonieren, also in höheren Graden verschmelzen. Alle übrigen Verwandtschaften sind indirekte. So sind die Töne c und d indirekt verwandt und zwar verwandt im zweiten Grade, insofern jeder von ihnen mit einem und demselben dritten, nämlich g, konsoniert und also zwei Schritte nötig sind, um von c zu d zu gelangen. Nach der Anzahl solcher Schritte richtet sich in jedem Falle der Grad der Verwandtschaft. Geht man beispielsweise von c eine Quinte aufwärts nach g und von hier eine Quarte abwärts nach d, dann wieder eine Quinte aufwärts nach a und abermals eine Quarte hinunter nach e, so ist dieses e im vierten Grade verwandt mit c, mit dem es, beiläufig bemerkt, eine sogenannte pythagoreische Terz bildet.*) Je nach der Art der Intervalle, durch welche man von einem

*) Anmerkung: Das Intervall (Schwingungszahlenverhältnis) der pythagoreischen Terz e:c ist gleich $\frac{81}{64}$. Es ist größer als die natürliche Terz e:c = 5:4, da $\frac{81}{64} = \frac{81}{80} \cdot \frac{5}{4}$ ist. Der Unterschied $\frac{81}{80}$ heißt syntonisches Komma.

Digitized by Google

Töne zum anderen fortschreitet, kann man Quintenverwandtschaft, Terzverwandtschaft und Quint-Terzverwandtschaft unterscheiden; ein Beispiel der letzteren Art wäre etwa die Beziehung zwischen c und h durch c—g—h. Die psychologische Realität weitläufiger Tonverwandtschaften ist problematisch. Die Verwandtschaften ersten und zweiten Grades genügen jedenfalls zur Erklärung der allgemeinen Grundzüge unserer Musik. Vor allem beruht auf der Tonverwandtschaft die Tatsache, daß mit der Entwickelung der Musik eine kleine Anzahl fester Stufen aus der unendlichen Zahl möglicher Tonkombinationen als allein brauchbar für die musikalische Verwendung herausgehoben worden ist. Auf die Struktur der dadurch entstandenen Tonleitern soll weiter unten noch näher eingegangen werden. Hier sei nur noch die Definition erwähnt, die Stumpf vom Intervalle im musikalischen Sinne aufstellt. Es ist nach ihm „ein Verhältnis zweier Töne, welches gegeben ist primär durch ihre Verwandtschaft, sekundär aber, d. h. bei gleicher Verwandtschaft, durch den relativen Abstand der beiden Töne."

Die dualistische Konsonanzdefinition.

Während die Verschmelzungstheorie die Verwandtschaft der Töne aus der Konsonanz erklärt, wollen A. v. Öttingen und Hugo Riemann dieses Verhältnis umkehren. Der Grundgedanke der von ihnen vertretenen Musiktheorie, der schon von Zarlino ausgesprochen, von Rameau und Tartini aufgenommen und von Moritz Hauptmann weiter durchgeführt ist, beruht in der Auffassung, daß der Durdreiklang (z. B. $c^1—e^1—g^1$) und der Molldreiklang (z. B. $c^1—es^1—g^1$) sich wie Spiegel-

Digitized by Google

bilder zu einander verhalten. Vergegenwärtigen wir uns den Ton C mit der Reihe seiner harmonischen Obertöne, so zeigt sich, daß unter diesen der Durakkord $c^1—e^1—g^1$ (4 : 5 : 6) vorkommt. Die Töne c^1, e^1, g^1 sind also Obertöne eines gemeinschaftlichen Grundtones (C); die Töne des Molldreiklanges c^1, es^1, g^1 dagegen haben einen gemeinschaftlichen harmonischen Oberton, nämlich g^3. Hinsichtlich der Lage der Durdreiklangstöne zu C einerseits und andererseits der Molldreiklangstöne zu g^3 besteht völlige Symmetrie, wovon man sich am Klavier sofort überzeugen kann. Während also beim Durdreiklang der Vereinigungspunkt unterhalb des Akkordes liegt und ihm, dem aufstrebenden, gewissermaßen als Fundament dient, senken sich die Töne des Molldreiklanges gleichsam von ihrem höheren Konvergenzpunkt herab in die Tiefe; ein Verhältnis, das Hauptmann mit den Worten zum Ausdrucke bringt: „Wie in den sinkenden Zweigen der Trauerweiden gegen den strebenden Lebensbaum, finden wir darum auch im Mollakkorde den Ausdruck der Trauer wieder.“ Die Verwandtschaft der Töne c^1, e^1, g^1 ist nun nach Öttingen durch den gemeinschaftlichen Grundton (C), den er „Tonika“ nennt, gegeben, die der Töne c^1, es^1, g^1 durch die gemeinschaftliche „Phonika“ g^3. Riemann kam zu dem gleichen Ergebnisse, indem er der Obertonreihe die Reihe der Untertöne gegenüberstellte. Wie c^1, e^1, g^1 Obertöne von C sind, so faßt er c^1, es^1, g^1 als Untertöne von g^3 auf und bezeichnet auch wohl den Durakkord als „Oberklang“ von C, den Mollakkord als „Unterklang“ von g^3. Die ganze Lehre von den Untertönen ist indessen nicht exakt begründet, beziehungsweise durch Beobachtungen von Stumpf widerlegt worden. Doch mag hier wenigstens zum besseren Verständnis dessen, was damit gemeint

Digitized by Google

ist, eine schematische Zusammenstellung der Unter- und Obertöne von c^0 folgen, wobei die Ziffern wie gewöhnlich die Verhältniswerte der Schwingungszahlen bedeuten sollen:

Untertöne							Obertöne						
C_2	D_2	F_2	As_2	C_1	F_1	C	c^0	c^1	g^1	c^2	e^2	g^2	b^2	c^3
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6	7	8
		Mollakkord								Durakkord				

Wie man sieht, besteht auch in dieser Darstellung zwischen den beiden Akkorden $c^2 — e^2 — g^2$ und $F_2 — As_2 — C_1$ eine Symmetriebeziehung, insofern sie durchaus spiegelbildlich zu c^0 liegen. Wir werden hierauf im nächsten Kapitel noch einmal zurückkommen.

Die Brücke vom Verwandtschafts- zum Konsonanzbegriff bildet das schon von Helmholtz für den Durdreiklang durchgeführte Prinzip der Klangvertretung. Die Töne des Durakkordes $c^2 — e^2 — g^2$ sind als Obertöne von c^0 charakteristisch für den Einzelklang c^0; sie können ihn „vertreten", indem wir diese Töne, wenn wir sie hören, als Elemente des Gesamtklanges auffassen, auch ohne daß c^0 selbst mitklingt. Der Grundton c^0 ist gleichsam das gemeinschaftliche Band für c^2, e^2 und g^2, durch das eine einheitliche Verknüpfung zustande kommt. Umgekehrt können auch, wie beim Molldreiklange, mehrere Töne auf einen gemeinsamen Oberton bezogen werden. Nach Öttingen sind nun Töne, welche sich auf einen gemeinsamen Grund- oder Oberton beziehen lassen, konsonant, und zwar ist die Konsonanz in ersterem Falle tonisch, im letzteren phonisch. Dissonant dagegen ist die Verbindung mehrerer Töne, die nicht einem und demselben Klange zugehören. So rührt die Dissonanz des

Digitized by Google

übermäßigen Dreiklanges c^1—e^1—gis^1 davon her, daß c^1 und e^1 im C-Klange, e^1 und gis^1 dagegen im E-Klange als Obertöne vorkommen, daß also sozusagen beide Grundklänge um die Herrschaft in der Auffassung kämpfen.

Eine notwendige Konsequenz dieser Lehre ist, daß Zweiklänge nie eindeutig als konsonant oder dissonant bezeichnet werden können. Die Töne e^1 und g^1 haben beispielsweise nicht nur den Grundton C, sondern auch den Oberton h^3 gemeinsam und wären daher sowohl tonisch als auch phonisch konsonant. Eindeutig verständlich sind in dieser Beziehung erst Dreiklänge, weshalb v. Öttingen überhaupt die Begriffe „konsonant" und „dissonant" nur zugleich mit dem Begriffe des Dreiklanges einführt. Die Behauptung, daß Zweiklänge an sich niemals konsonant oder dissonant wären, ist aber ein bedenklicher Punkt. Sie steht in offenbarem Widerspruche mit jeglichem musikalischen Bewußtsein, wie denn auch die Oktave selbst von den Dualisten stillschweigend als die vollkommenste Konsonanz anerkannt wird.

Vor allem jedoch kehren gegenüber dem Versuche, die Konsonanz durch Mitwirkung von Obertönen beziehungsweise Untertönen zu erklären, solche Einwände wieder, wie sie gegen die ähnliche Helmholtzsche Deduktion geltend gemacht worden sind, und die Theorie v. Öttingens hat noch insofern einen besonders schwierigen Stand, als sie ausgiebig mit bloß vorgestellten Hilfstönen operieren muß. Beim Molldreiklang ist es freilich unter günstigen Umständen möglich, daß der phonische Oberton gehört wird, und beim Zusammenklange der Töne c^1, e^1, g^1 tritt auch die „Tonika" C als Differenzton auf, worauf Riemann besonderes Gewicht gelegt hat; aber wenn c^1, e^1, g^1 nacheinander

Digitized by Google

angegeben werden, kann das C, da es Untertöne nicht gibt, nur noch als vorgestellter Ton mitwirken, während in Wirklichkeit jeder Unbefangene zugeben wird, daß für das Urteil über Konsonanz oder Dissonanz eines Intervalles derartige Erinnerungen an andere Töne nicht notwendig sind. Es widerspricht aller psychologischen Erfahrung, daß Nebentöne, die der überwiegenden Mehrzahl der Musiker selbst da, wo sie faktisch existieren, nicht zum Bewußtsein kommen, in anderen Fällen, wenn sie gar nicht objektiv vorhanden sind, nur aus der Erinnerung heraus den Charakter einer akustischen Wahrnehmung ausschlaggebend beeinflussen sollten. Konsonanz und Dissonanz sind so sinnfällige Eindrücke, daß sie nur in den unmittelbaren Empfindungen begründet sein können, wie es die Verschmelzungstheorie annimmt.

Leiterbildung.

Die historischen Vorstufen unserer Leitern gehören ebenso wie die Entwickelung der Harmonielehre in das Gebiet der Musikwissenschaft. Hier kommt es nur darauf an, die akustischen Grundlagen des gegenwärtigen Leiterbaues so einfach als möglich darzustellen.*)

Wir verstehen unter einer Tonleiter eine Auswahl bestimmter Stufen, welche zur Melodiebildung benutzt werden. In dieser Hinsicht kommen unter den einzelnen Völkern erhebliche Unterschiede vor; in einem Punkte aber beruhen alle Leitern auf dem Verwandtschaftsprinzip, nämlich in Bezug auf die Oktave. Nur innerhalb derselben handelt es sich um verschiedene Einteilungen. Hier scheinen manche Nationen, wie die Javaner und

*) Für das Folgende sind mir die Anschauungen von Prof. C. Stumpf im wesentlichen maßgebend gewesen.

Digitized by Google

Stamesen, so vorgegangen zu sein, daß sie das Oktavenintervall nach dem Gehör in eine bestimmte Anzahl gleicher Stufen, fünf oder sieben, einteilten, also dasselbe Prinzip anwendeten, auf das sich unsere gleichschwebende Temperatur gründet. Die weitaus meisten haben indessen das Verwandtschaftsprinzip auch innerhalb der Oktave durchgeführt. Wir haben dabei zwei Hauptformen zu unterscheiden: Quintenleitern und Quint-Terzenleitern, welche beide in ihren historisch wichtigsten Erscheinungen sieben Stufen haben. Die fünfstufigen Leitern, die sich in weniger hoch entwickeltem Musikzustande vorfinden, kann man sich so entstanden denken, daß aus der siebenstufigen Leiter die beiden Halbstufen weggelassen sind. Es sollen im folgenden nur die siebenstufigen Leitern betrachtet werden.

Quintenleitern (Pythagoreische Leitern).

Die Quintenleitern entstehen durch fortgesetzte Quintenschritte nach oben oder nach unten von einem gegebenen Ausgangstone (der Tonika) aus, wobei die über die Oktave hinausfallenden Töne in die Oktave zurücktransponiert werden. Man kann auch so verfahren, daß man abwechselnd eine Quinte nach oben und eine Quarte nach unten geht, beziehungsweise eine Quinte nach unten und eine Quarte nach oben. An sich würde man auf solchem Wege nie zu einer begrenzten Zahl von Tönen gelangen, sondern zu immer mehr und immer kleineren Stufen innerhalb der Oktave bis ins Unendliche. Gehen wir nämlich vom Ausgangstone 12 Quintenschritte aufwärts, so kommen wir zu einem Tone, der nahezu die siebente Oktave des Ausgangstones ist, weshalb man hier auch von einem Quintenzirkel spricht; aber der Kreis schließt sich eben nicht ganz genau, in-

Digitized by Google

dem 12 Quintenschritte aufwärts zu einem etwas höheren Tone führen als 7 Oktavenschritte.*) Eine begrenzte und mit den tatsächlich vorliegenden (gebräuchlichen) Leitern zusammenfallende Reihe erhält man auf folgende Weise.

Man bildet zuerst ein Grundschema durch einen Quintenschritt nach innen von den beiden Grenztönen der Oktave, also etwa von c^0 und c^1 aus und bekommt so g und f. Dann geht man einerseits von c auf einem der eben erwähnten Wege aufwärts andererseits von c^1 abwärts, bis die beiden Zwischenräume c f und g c^1 ausgefüllt sind, genauer gesagt, bis der erste Ton (nämlich fis resp. ges) erscheint, der nicht in diese Zwischenräume fällt. Hier macht man Halt und hat dann die Reihen:

c d e f g a h c^1

c des es f g as b c^1

Das Grundschema wird also durch eine Vereinigung des ersten Quintenschrittes nach oben und des ersten nach unten gebildet, die weitere Fortsetzung aber durch Quintenschritte entweder nach oben oder nach unten. Die erste Leiter fällt anscheinend mit unserer Durleiter zusammen, doch sind e, a und h nicht genau in derselben Stimmung wie bei uns, weil wir sie durch Vermittelung von Terzen erzeugen. Die zweite Leiter, also die durch absteigende Quintenschritte von c^1 aus gewonnene, war die Grundleiter der Griechen (Dorisch), wenn wir ihren Theoretikern Glauben schenken. Die Zwischenräume c — f und g — c^1 nannten sie Tetrachord (Viertonraum). Auf die weiteren Veränderungen, welche durch Verlegung des Grundtones

*) Anmerkung: Der Unterschied ist gleich $\frac{74}{73}$, welches Intervall pythagoreisches Komma heißt.

Digitized by Google

auf andere Töne derselben Reihe sowie durch Einschiebung und Auslassung von Tönen innerhalb der Tetrachorde entstanden, gehen wir hier nicht ein. Auch die Leiter des sogenannten verbundenen Systemes, wobei das zweite Tetrachord mit dem letzten Ton des ersten anhebt und genau die Verhältnisse des ersten wiederholt, hat nur historische Bedeutung. Derartige mehr künstliche Konstruktionen finden sich besonders bei Völkern, welche mit Saiteninstrumenten musizierten, wie die Araber und Perser, haben sich aber nicht dauernd eingebürgert. Wahrscheinlich ist auch sogar die pythagoreische Abstimmung nur ein Produkt der Lyra, denn dem natürlichen Gehör an und für sich ist es unmöglich, bei dem Schritte c—e den Weg durch 4 Quinten aufwärts und 2 Oktaven abwärts zu machen. Der Gesang hat sich daher vielleicht auch bei den Griechen in den sogenannten natürlichen Intervallen vollzogen, und der Unterschied gegenüber der pythagoreischen Stimmung ist in der Praxis nicht merklich gewesen, wie ja auch bei uns die natürliche Terz und die temperierte Terz gleichzeitig in demselben Akkorde von Sängern und Klavierspielern angegeben wird.

Quint-Terz-Leitern oder Dreiklangsleitern.

Nachdem im Mittelalter in den sogenannten Kirchentonarten wesentlich das System der Griechischen Leitern fortbestanden hatte, vollzog sich nach dem Aufkommen der mehrstimmigen Musik im musikalischen Bewußtsein die Begründung der Melodietöne auf Akkordtöne. Akkorde aber drängen das Gehör zur sogenannten reinen oder natürlichen Terz 4 : 5, da der Unterschied im Wohlklange zwischen dieser und der pythagoreischen Terz beim Gebrauche gleichzeitiger Tonverbindungen so ekla-

Digitized by Google

tant ist, daß er dem Ohre nicht entgehen kann. Doch hat erst Zarlino 1558 die reine Terz in ihre Rechte eingesetzt.

Auf dem alten Grundschema c f g c^1 sind auch die modernen Leitern aufgebaut. Man bezeichnet f als Subdominante, g als Dominante, und schon darin ist ihre grundlegende Bedeutung ausgedrückt. Aber die weitere Tonerzeugung erfolgt nach dem Prinzip des Dreiklanges auf jedem der Töne c, f und g. Die drei Durdreiklänge c—e—g, f—a—c, g—h—d ergeben die Töne unserer Durleiter:

c d e f g a h c^1,

die Molldreiklänge c—es—g, f—as—c, g—b—d unsere sogenannte absteigende Mollleiter:

c d es f g as b c^1,

in welcher aber bekanntlich beim Aufsteigen b durch h und meist auch as durch a ersetzt wird. Dies geschieht aus dem Grunde, weil man zunächst h als „Leitton" nach c^1 brauchte, besonders im Akkord der Dominante, der zum abschließenden Tonikaakkord hinüberführt; und weil dann der große und schlecht sangbare Schritt as—h vermieden werden sollte, so wurde neben h auch a aus der Durleiter herübergenommen.

Während hier die beiden Leitern Dur und Moll durch Akkorde von c, f und g aus nach oben gebildet, dabei aber zweierlei Terzen, große für Dur und kleine für Moll, gebraucht sind, werden nach der Betrachtungsweise v. Öttingens, Riemanns und ihrer Vorläufer nur große Terzen, das eine Mal aber aufsteigende, das andere Mal absteigende Dreiklänge benutzt. Ebenso nämlich, wie man die pythagoreischen Leitern durch Quintenschritte nach oben und nach unten

Digitized by Google

gewinnen kann und je nach der Richtung der Tonschritte verschiedene Leitern erhält, ebenso kann man es auch mit Dreiklängen halten. Dieselben Verhältnisse, die nach oben genommen den Durdreiklang ergeben, liefern nach unten genommen den Molldreiklang, was aus der früher erwähnten spiegelbildlichen Lage der Töne folgt. Hiernach wäre also im Moll nicht der unterste, sondern der höchste Ton des Dreiklanges Hauptton, und man hat ihn deshalb zum Unterschiede von dem Haupttone des Dur, der Tonika, als Phonika bezeichnet. Von diesem Standpunkte aus erhält man von c^1 ausgehend nach unten die Dreiklänge c^1—as—f, g—es—c, f—des—B, also, wenn wir B in die kleine Oktave transponieren, die absteigende Leiter c^1 b as g f es des c, welche, abgesehen von den durch die natürlichen Terzen gegebenen feinen Unterschieden der Abstimmung, mit der alten dorischen Leiter zusammenfällt. Diese würde also unsere wahre ursprüngliche Molleiter sein. Allein die ganze Auffassung, auf Grund deren man übrigens auch das gesamte Akkordsystem darzustellen unternommen hat, ist, wie wir schon früher gesehen haben, gekünstelt und entspricht keineswegs dem wirklichen musikalischen Bewußtsein. Tatsächlich ist und bleibt im Moll- wie im Durakkord der unterste Ton Hauptton.

Alterierte Töne und chromatische Leitern.

Die bisher besprochenen Leitern nennt man diatonische. Schon früh im Kirchengesange des Mittelalters fand man sich nun zu gelegentlichen Erhöhungen und Vertiefungen einzelner Stufen veranlaßt, und in der neueren Musik ist man hierin immer weiter gegangen. Denn mit dem Gebrauche von Akkorden stellte sich immer mehr auch der Gebrauch von Ausweichungen (Modu-

Digitized by Google

lationen) ein, d. h. es tritt an die Stelle der ursprünglichen Tonika eine andere, was sich dem musikalischen Bewußtsein dadurch ankündigt, daß man einen oder mehrere Töne so erhöht oder vertieft, wie es die neue Tonika und ihre Leiter verlangt. Selbst viele Volkslieder enthalten ja solche Ausweichungen, besonders in die nächstliegende Tonart der Dominante. Nach einer solchen durch den Reiz der Abwechselung begründeten Ausweichung kehrt man dem Einheitsbedürfnis entsprechend wieder zur ursprünglichen Tonika zurück.

Man sieht leicht, wie auf solche Art, von der c-Leiter ausgehend, die von uns jetzt mit ♯ und ♭, weiterhin mit mehrfachen Kreuzen und Been bezeichneten Töne zustande kommen. Fügt man die einfach (durch ♯) erhöhten in die Durleiter insoweit ein, daß die Schritte sämtlich für das Gehör den bereits in ihr vorhandenen Halbtonstufen gleich werden, so entsteht die aufsteigende chromatische Leiter

c cis d dis e f fis g gis a ais h c^1.

Verfährt man ebenso bei den einfach (durch ♭) erniedrigten Tönen, so entsteht die absteigende chromatische Leiter

c^1 h b a as g ges f e es d des c.

Die mathematische Berechnung der alterierten Töne erfolgt nach den gleichen Prinzipien wie die der diatonischen Leiter. So ist beispielsweise cis^1 als große Oberterz von a gleich $\frac{5}{3} \cdot \frac{5}{4}$; des als große Unterterz von f gleich $\frac{4}{3} \cdot \frac{4}{5}$. Hieraus sieht man zugleich, daß cis und des nicht zusammenfallen: ihren Unterschied nennt man enharmonisch.

Digitized by Google

Auch das Verhältnis von c zu seiner Alteration cis ist nicht genau dasselbe wie das Verhältnis h : c, obwohl wir beide als Halbtonschritte bezeichnen. cis : c ist nämlich gleich $\frac{5}{4} \cdot \frac{5}{6} = \frac{25}{24}$, während das Intervall $c : h = \frac{16}{15}$ ist. Man nennt dieses den **großen**, jenes den **kleinen Halbton**. Der Unterschied beider ist wieder ein enharmonischer.

Unsere „Tonarten".

Mit den Ausweichungen hängt ferner das System der Tonarten zusammen, d. h. der Leitern, welche entstehen durch Übertragung der gleichen Tonverhältnisse, wie wir sie von einem gegebenen Grundtone aus gefunden haben, auf andere Töne der diatonischen oder chromatischen Leitern (G-dur, D-dur u. s. w., F-moll, B-moll u. s. w.).

Der Ausdruck Tonarten ist schlecht gewählt, da eben die Tonverhältnisse in den verschiedenen Tonarten genau die gleichen sind. Nur die griechischen Tonarten waren Tonarten im eigentlichen Sinne. Was wir so nennen, entspricht ihren **Transpositionsskalen**, doch ist der Ausdruck bei uns nun einmal hergebracht und wird nicht zu verbannen sein.

Die Zahl der Tonarten ist an sich unbeschränkt, da man mit Ausweichungen immer weitergehen kann. Sie wird aber begrenzt durch dreierlei, nämlich erstens dadurch, daß in unserer Schreibung der Noten und in dem Baue der maßgebenden Tasteninstrumente die C-dur-Tonleiter als eine solche von bestimmten (nur nach den Stimmungen noch schwankenden) absoluten Tonhöhen zu Grunde gelegt wird, für welche keine Vor-

Digitized by Google

zeichnung geschrieben wird und nur weiße Tasten in Gebrauch sind; zweitens dadurch, daß die Zahl der Vorzeichnungen, die bei Alterationen von da aus vorgeschrieben werden, eine Grenze haben muß, wenn die Noten lesbar sein sollen; drittens dadurch, daß enharmonische Verwechselungen benutzt werden, wovon weiter unten noch die Rede sein wird. In unserer Musik pflegt man sich im Dur mit sieben Kreuz-Tonarten (letzte Cis-dur) und sechs Be-Tonarten (letzte Ges-dur), im Moll mit sechs Kreuz-Tonarten (letzte Dis-moll) und sieben Be-Tonarten (letzte As-moll) zu begnügen. Mit C-dur und A-moll zusammen haben wir also vierzehn Dur- und vierzehn Moll-Tonarten, was freilich das Vorkommen noch weiterer Tonarten in einzelnen Fällen nicht ausschließt. Daß die Grenze gerade hier gezogen wird, rührt wohl nur von dem äußerlichen Umstande her, daß sonst Doppelkreuze und Doppelbeen in der Schreibung erforderlich würden. Doch würde ein Ces-dur und ein Ais-moll noch mit einfacher Vorzeichnung möglich sein. Für das Klavier mit seiner temperierten Stimmung fallen ja ohnedies Cis und Des u. s. w. zusammen, so daß hier tatsächlich nur zwölf Tonarten in Dur und zwölf in Moll existieren und die übrigen bloße Schreibverschiedenheiten sind.

Für einen Sänger mit idealer Intonation würden alle diese Tonarten bezüglich ihrer Grundtöne tatsächlich verschieden sein und wäre daher überhaupt keine Begrenzung im Fortschritt zu immer neuen Tonarten gegeben. Für den wirklichen Sänger hört die Sicherheit der Intonation durch Unterscheidung so wenig verschiedener Töne, wie sie durch immer weiteres Modulieren in einer bestimmten Richtung entstehen, irgendwo auf. Genügende Beobachtungen hierüber sind noch nicht vor-

Digitized by Google

handen; aber es ist anzunehmen, daß diese Grenze auch für den besten Sänger schon früher eintritt als für das musikalische Auge und Vorstellungsvermögen und daß er, z. B. von c ausgehend und allmählich durch eine große Anzahl von Zwischenstufen das eine Mal nach Fis-dur, das andere Mal nach Ges-dur modulierend, keinen sicheren und konstanten Unterschied zwischen fis und ges erzielen würde. Wir würden in dieser Hinsicht nicht einmal nötig haben, so viele Tonarten zu unterscheiden, wie wir es faktisch tun. Daß es trotz der Einrichtung des Klavieres und trotz der begrenzten Fähigkeiten des Sängers geschieht, hängt mit dem Bedürfnisse des musikalischen Denkens zusammen. Es widerstrebt uns beispielsweise, wenn wir von H-dur nach Cis-dur modulieren, statt des Cis ein Des hinzuschreiben, weil dies eine unlogische Schreibweise sein würde. Dies hat großen Einfluß sowohl auf den Leser als auch auf den Sänger der Noten, welch letzterer von Vorstellungen über den inneren Zusammenhang der Tonarten in hohem Maße abhängt und in Verwirrung gerät, wenn er in dem erwähnten Falle von dem erhöhten Leittone des h, also von his aus des oder gar dessen Terz f intonieren soll, während er cis oder eis ohne weiteres versteht und trifft.

Das musikalische Denken würde sogar gebieterisch verlangen, daß auch in der Schreibung nie eine enharmonische Vertauschung stattfinde, ausgenommen wenn sie vom Komponisten zu bestimmten Wirkungen beabsichtigt ist. Aber davon wird aus praktischen Gründen doch abgegangen und die bequemere Schreibweise vorgezogen, wo es ohne Gefahr für die Sicherheit der Intonation geschehen kann. Bei sehr stark modulierenden neueren Stücken würden sonst in der Tat viel mehr Tonarten zum Vorschein kommen. Sie sind auch wirklich vor-

Digitized by Google

handen, sofern sie in der Konsequenz der Modulation liegen, vom Komponisten gewollt und vom Hörer verstanden werden, aber sie werden nicht geschrieben.

Enharmonische Unterschiede und temperierte Leitern.

Enharmonische Unterschiede nannte man in der alten griechischen Musik gewisse feine Unterschiede, welche kleiner waren als ein Halbton. Durch die Einführung solcher Unterschiede hatte man neue Leitern gebildet, die bestimmten Ausdruckszwecken dienten, aber auch nur zeitweise im Gebrauche waren. Bei uns kommen infolge der Alterationen noch kleinere Unterschiede zum Vorschein, wie wir an cis und des gesehen haben. Alle diese verschieden bezeichneten Töne fallen untereinander theoretisch nicht zusammen und werden auch von einem geschulten Sänger unter Umständen gut und leicht auseinander gehalten. Wenn er z. B. von c aus über es nach ges geht und wenn er von demselben Ausgangstone aus über a nach fis geht, so erzielt er nicht genau denselben Ton, und der Unterschied wird kein zufälliger sondern ein konstanter sein, im Gegensatze zu dem vorhin angenommenen Falle, wo der Übergang durch Modulationen in vielen Zwischenstufen erfolgt.

Hierzu kommt, daß gleich bezeichnete Töne in verschiedenem Zusammenhange eine verschiedene Höhe annehmen. So erhalten wir vom tiefsten Geigentone g aus als reine große Sexte ein bestimmtes e^1; wenn wir aber in Quinten aufwärts gehen, wie beim Stimmen der Geige, so kommen wir zu einem e^2, welches nicht genau mit der Oktave des vorherigen zusammenfällt, sondern als pythagoreisches etwas höher ist. Ebenso

Digitized by Google

verhält es sich in vielen Fällen mit anderen Tönen. Wenn wir von c aus über a nach fis gehen und wenn wir über d nach fis gehen, erhalten wir zweierlei fis und zwar sowohl nach der Berechnung als auch nach der Intonation guter Sänger und Geiger.

Auf den Tasteninstrumenten und allen anderen mit festen Tönen ist es praktisch unmöglich, derartigen Feinheiten gerecht zu werden. Man müßte innerhalb einer Oktave eine übergroße Anzahl von Tasten herstellen, um nur die wichtigsten Unterschiede dieser Art zu fixieren. Daher hat man alle nur so wenig wie cis und des oder die diversen e's verschiedenen Töne zusammengelegt und sich auf eine chromatische Leiter beschränkt, welche nur zwölf Stufen von der annähernden Größe eines Halbtones enthält. Mathematisch genau können diese dann allerdings nicht mit den Halbtönen 15 : 16 beziehungsweise 24 : 25 übereinstimmen, weil eben durch das Zusammenfallen von cis und des u. s. w. kleine Abweichungen von der Reinheit erforderlich werden.

So entstehen die *temperierten Leitern*. Man unterscheidet *ungleichschwebende* und *gleichschwebende Temperatur*. Bei der ersteren sind einige besonders wichtige Intervalle mathematisch rein, die übrigen zeigen aber um so größere Abweichungen von der Reinheit (sogenannte „Wölfe"). Die Mißstände dieser Einrichtung haben seit dem 18. Jahrhundert die allgemeine Einführung der gleichschwebenden Temperatur veranlaßt, bei welcher alle Abweichungen gleichmäßig verteilt sind und jede Halbtonstufe jeder anderen gleich ist.

In dieser gleichschwebenden temperierten Stimmung sind die großen Terzen etwas zu groß, die kleinen zu klein und zwar immer noch so viel, daß die Abweichung für geübte Ohren unter günstigen Umständen merklich ist.

Digitized by Google

Die Quinten sind ein wenig zu klein, doch ist die Differenz hier geringer. Diese Einrichtung ist indessen nicht sowohl ein notwendiges Übel als vielmehr ein unschätzbarer Vorteil und für unsere jetzige Musik ganz unentbehrlich, da sie den Reichtum der Modulation infolge der enharmonischen Vertauschungen ins Ungemessene erhöht. Die Abweichungen von der Reinheit können nur bei langsamen und gehaltenen konsonanten Akkorden merklich werden. Aber auch hier trägt ein besonderer Umstand dazu bei, sie weniger fühlbar zu machen. Man ist nämlich ohnedies geneigt, wie schon früher erwähnt wurde, die großen Terzen etwas größer, die kleinen etwas kleiner zu nehmen, als es der mathematischen Reinheit entspricht, und zwar nicht nur bei Aufeinanderfolge sondern auch bei Gleichzeitigkeit der Töne. Es ist dies nicht etwa erst eine Folge der Gewöhnung an die Temperatur, sondern unabhängig davon, wie daraus hervorgeht, daß auch Quinten, ja sogar Oktaven von den besten Musikern etwas zu hoch genommen werden und eine gegebene wirklich reine Oktave als etwas zu tief geschätzt wird.

Der Grund hiervon liegt offenbar in den Bedürfnissen des musikalischen Ausdruckes, nicht in der Einrichtung des Ohres oder in den Gesetzen des Hörens als solchen. Manche haben wohl daran gedacht, daß die pythagoreische Stimmung doch unserem Ohre angemessener sei als die sogenannte reine Stimmung. Aber dem widerspricht das Verhalten der Oktave, die doch auch nach der pythagoreischen Stimmung rein bleiben müßte und dennoch mit Vorliebe erhöht wird. Daher kann die Erklärung nur eine psychologische sein. Was die Terz anlangt, so hat bereits Hauptmann darauf hingewiesen, daß man das Charakteristische des Intervalles gern accentutert und daher die große Terz leicht zu groß, die kleine leicht zu klein nimmt.

Digitized by Google

Dieser Umstand kommt also dem Gebrauche der gleichschwebenden Temperatur sehr zu statten. Dazu kommt nun eine andere Eigentümlichkeit der Intonation, daß nämlich Sänger und Geiger cis in der Regel höher intonieren als des, während es der Berechnung nach tiefer sein müßte. Dies zeigt, daß das Ausdrucksbedürfnis — cis ist Leitton nach oben, des nach unten — über das Bedürfnis absoluter Reinheit bis zu einem gewissen Grade den Sieg davonträgt, und daß die gleichschwebende Temperatur, welche einen zwischen cis und des liegenden Ton wählt, sozusagen von vornherein einem natürlichen Ausdrucksbedürfnis auf halbem Wege entgegenkommt.

Trotzdem sind teils aus theoretischen, teils aus praktischen Gründen — so, um für den A capella-Gesang eine praktische Stütze zu haben — in neuerer Zeit mehrfach, von Bosanquet, G. Engel, Eitz, Tanaka, Helmholtz und anderen, Tasteninstrumente (Enharmoniums) gebaut, die mehr als zwölf Töne in der Oktave haben und den enharmonischen Unterschieden mehr oder weniger Rechnung tragen.

Unter den gleichschwebenden Temperaturen mit einer größeren Anzahl von Tonstufen innerhalb der Oktave als zwölf sei das von Mercator vorgeschlagene und von Bosanquet ausgeführte System der 53stufigen Skala hervorgehoben, bei dem die Annäherungen an die Reinheit schon sehr groß und die Abweichungen davon für das Gehör kaum noch wahrzunehmen sind.

Digitized by Google

In gleichem Verlage erschienen:

Musikalische Formenlehre

(Kompositionslehre)

2 Bände. von 2 Bände.

Stephan Krehl.

(Sammlung Göschen Nr. 149/150.)

Mit zahlreichen Notenbeispielen.

Preis: in Leinwand gebunden je 80 Pfennige.

Harmonielehre

von

A. Halm.

(Sammlung Göschen Nr. 120.)

Mit vielen Notenbeilagen.

Preis: in Leinwand gebunden 80 Pfennige.

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung in Leipzig.

Digitized by Google

Geschichte
der
alten und mittelalterlichen Musik
von
Dr. A. Möhler

(Sammlung Göschen Nr. 121)

Preis: in Leinwand gebunden 80 Pfg.

Das vorliegende Bändchen bietet das Wissenswerteste aus der antiken und mittelalterlichen Musikgeschichte. Die Musik des vorklassischen Altertums, über welche die Quellen noch sehr spärlich und trübe fließen und die zumal als praktische Musik mehr kultur- als musikhistorisch von Wert und Interesse sein mag, ist in kurzen Zügen geschildert, und um so mehr Raum der klassischen Antike, der griechisch-römischen Musik vorbehalten, mit der man sich eigentlich erst auf festerem Boden befindet, deren Erforschung gerade in unserer Zeit manchen Fortschritt zu verzeichnen hat und die zweifellos für die altchristliche Musik von der einschneidendsten Bedeutung wurde. Ein nicht geringeres Interesse konnte sodann jener Gesang in Anspruch nehmen, auf dem die ganze abendländische Musikentwickelung ruht, der sogenannte Gregorianische Choral. Die Geschichte der griechischen, wie der gregorianischen Musik suchte der Verfasser allenthalben auf den Stand der neuesten Forschung zu bringen, ohne dabei der Bildung eines selbständigen Urteils vorzugreifen. Nach möglichst sorgfältiger Behandlung genannter Epochen konnte um so mehr für die folgende Periode der vokalen Mehrstimmigkeit auf Verständnis gerechnet werden, die in der Hauptsache bis zum Beginn der Reformation und einer musikalischen Renaissance reicht, naturgemäß aber doch mit der Blüte der Polyphonie und ihren beiden Heroen, Palestrina und Orlando, abschließt.

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung in Leipzig.

Digitized by Google

Sammlung Göschen

Je in elegantem Leinwandband 80 Pf.

69 **Englische Litteraturgeschichte** v. Dr. Karl Weiser in Wien.

70 **Griechische Litteraturgeschichte** mit Berücksichtigung der Geschichte der Wissenschaften von Dr. Alfred Gercke, Professor an der Universität Greifswald.

71 **Allgemeine und physikalische Chemie** von Dr. Max Rudolphi, Dozent an der Technischen Hochschule in Darmstadt. Mit 22 Figuren.

72 **Projektive Geometrie** in synthetischer Behandlung von Dr. Karl Doehlemann, Privatdozent an der Universität München. Mit 85 zum Teil zweifarbigen Figuren.

73 **Völkerkunde** von Dr. Mich. Haberlandt, k. u. k. Custos der ethnograph. Sammlung d. naturh. Hofmuseums u. Privatdozent an der Univ. Wien. Mit 56 Abbildungen.

74 **Die Baukunst des Abendlandes** von Dr. K. Schäfer, Assistent am Gewerbemuseum in Bremen. Mit 22 Abbildungen.

75 **Die graphischen Künste** v. Carl Kampmann, Fachlehrer an d. k. k. Graphischen Lehr- und Versuchsanstalt in Wien. Mit 3 Beilagen und 40 Abbildungen.

76 **Theoretische Physik.** I. Teil: Mechanik u. Akustik. Von Dr. Gust. Jäger, Professor a. d. Univ. Wien. Mit 19 Abbildungen.

77 **Theoretische Physik.** II. Teil: Licht und Wärme. Von Dr. Gust. Jäger, Professor an der Universität Wien. Mit 47 Abbildungen.

78 **Theoretische Physik.** III. Teil: Elektrizität und Magnetismus. Von Dr. Gustav Jäger, Professor a. der Universität Wien. Mit 33 Abbildgn.

79 **Gotische Sprachdenkmäler** mit Grammatik, Uebersetzung und Erläuterungen von Dr. Herm. Jantzen in Breslau.

80 **Stilkunde** von Karl Otto Hartmann, Gewerbeschulvorstand in Mosbach. Mit 12 Vollbildern und 179 Textillustrationen.

81 **Vierstellige Tafeln und Gegentafeln** für logarithmisches und trigonometrisches Rechnen in zwei Farben zusammengestellt von Dr. Herm. Schubert, Professor an der Gelehrtenschule des Johanneums in Hamburg.

82 **Grundriß d. lateinischen Sprachlehre** von Professor Dr. W. Votsch in Magdeburg.

83 **Indische Religionsgeschichte** von Dr. Edmund Hardy, Professor a. d. Universität Würzburg.

84 **Nautik.** Kurzer Abriß des täglich an Bord von Handelsschiffen angewandten Teils der Schiffahrtskunde. Von Dr. Franz Schulze, Direktor d. Navigations-Schule zu Lübeck. Mit 56 Abbildungen.

85 **Französische Geschichte** von Dr. R. Sternfeld, Professor an der Universität Berlin.

86 **Kurzschrift.** Lehrbuch der Vereinfachten Deutschen Stenographie (Einigungs-System Stolze-Schrey) nebst Schlüssel, Lesestücken u. einem Anhang von Dr. Amsel, Oberlehrer des Kadettenhauses in Oranienstein.

87 **Höhere Analysis I:** Differentialrechnung. Von Dr. Frdr. Junker, Professor am Realgymnasium u. an der Realanstalt in Ulm. Mit 68 Fig.

88 **Höhere Analysis II:** Integralrechnung. Von Dr. Frdr. Junker, Professor am Realgymnasium u. an d. Realanstalt in Ulm. Mit 89 Fig.

89 **Analytische Geometrie d. Raumes** von Professor Dr. M. Simon in Straßburg. Mit 28 Figuren.

90 **Ethik** von Dr. Thomas Achelis in Bremen.

91 **Astrophysik,** die Beschaffenheit der Himmelskörper von Dr. Walter F. Wislicenus, Professor an der Universität Straßburg. Mit 11 Abbild.

92 **Mathematische Geographie,** zusammenhängend entwickelt und mit geordneten Denkübungen versehen v. Dr. Kurt Geißler in Charlottenburg. Mit 14 Figuren.

93 **Deutsches Leben im 12. Jahrhundert.** Kulturhistor. Erläuterungen zum Nibelungenlied und zur Kudrun. Von Professor Dr. Jul. Dieffenbacher in Freiburg i. B. Mit 1 Tafel und 30 Abbildungen.

Wenden!

Sammlung Göschen

Je in elegantem Leinwandband **80 Pf.**

94 **Photographie.** Von H. Keßler, Fachlehrer an der k. k. Graphischen Lehr- und Versuchsanstalt in Wien. Mit 4 Tafeln und 52 Abbildungen.

95 **Paläontologie.** Von Dr. Rud. Hoernes, Professor an der Universität Graz. Mit 87 Abbildungen.

96 **Bewegungsspiele** von Dr. E. Kohlrausch, Professor am Kgl. Kaiser-Wilhelms-Gymn. zu Hannover. Mit 14 Abbildungen.

97 **Stereometrie** von Dr. Glaser in Stuttgart. Mit 44 Figuren.

98 **Grundriß der Psychophysik** von Dr. G. F. Lipps in Straßburg. Mit 5 Figuren.

99 **Ebene und sphärische Trigonometrie** von Dr. Gerh. Hessenberg in Charlottenburg. Mit 69 ein- u. zweifarbigen Figuren.

100 **Sächsische Geschichte** von Prof. Dr. Otto Kaemmel, Rektor des Nicolaigymnasiums zu Leipzig.

101 **Sociologie** von Prof. Dr. Thom. Achelis in Bremen.

102 **Geodäsie** von Dr. C. Reinhertz, Professor an der Technischen Hochschule Hannover. Mit 66 Abbild.

103 **Wechselkunde** von Dr. G. Funk in Mannheim. Mit vielen Formul.

104 **Oesterreichische Geschichte I:** Von der Urzeit bis 1526 von Hofrat Dr. Frz. v. Krones, Professor an der Universität Graz.

105 **Oesterreich. Geschichte II:** Von 1526 bis zur Gegenwart von Hofrat Dr. Frz. v. Krones, Professor an der Universität Graz.

106 **Forstwissenschaft** von Dr. Ad. Schwappach, Professor an d. Forstakademie Eberswalde, Abteilungsdirigent bei der Hauptstation des forstl. Versuchswesens.

107 **Geschichte der Malerei I** von Dr. Rich. Muther, Professor an d. Universität Breslau.

108 **Geschichte der Malerei II** von Dr. Rich. Muther, Professor an d. Universität Breslau.

109 **Geschichte der Malerei III** von Dr. Rich. Muther, Professor an d. Universität Breslau.

110 **Geschichte der Malerei IV** von Dr. Rich. Muther, Professor an d. Universität Breslau.

111 **Geschichte der Malerei V** von Dr. Rich. Muther, Professor an d. Universität Breslau.

114 **Klimalehre** von Professor Dr. W. Köppen, Meteorologe d. Seewarte Hamburg. Mit 7 Tafeln u. 2 Figuren.

115 **Buchführung.** Lehrgang der einfachen und doppelten Buchhaltung von Robert Stern, Oberlehrer der Oeffentl. Handelslehranstalt u. Dozent der Handelshochschule zu Leipzig. Mit vielen Formularen.

116 **Die Plastik des Abendlandes** von Dr. Hans Stegmann, Konservator am German. Nationalmuseum zu Nürnberg. Mit 23 Tafeln.

117 **Griechische Grammatik I:** Formenlehre von Dr. Hans Meltzer, Prof. a. d. Klosterschule z. Maulbronn.

118 **Griechische Grammatik II:** Bedeutungslehre und Syntax von Dr. Hans Meltzer, Professor a. d. Klosterschule zu Maulbronn.

119 **Abriß der Burgenkunde** v. Hofrat Dr. Otto Piper in München. Mit 29 Abbildungen.

120 **Harmonielehre** von A. Halm, Musikdirektor in Stuttgart. Mit vielen Notenbeilagen.

121 **Geschichte der alten und mittelalterlichen Musik** von Dr. A. Möhler in Tübingen. Mit zahlreichen Abbildgn. u. Musikbeilagen.

122 **Das Pflanzenreich.** Einteilung d. gesamten Pflanzenreichs mit den wichtigsten und bekanntesten Arten von Dr. F. Reinecke in Breslau u. Dr. W. Migula, Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Mit 50 Figuren.

123 **Nutzpflanzen** von Dr. J. Behrens in Weinsberg. Mit 55 Abbildungen.

124 **Die deutschen Altertümer** von Dr. Franz Fuhse, Direktor d. städt. Museums in Braunschweig. Mit 70 Abbildungen.

125 **Italienische Litteraturgeschichte** von Dr. Karl Voßler, Privatdozent a. d. Universität Heidelberg.

Digitized by Google

Mus 99.774
Musikalische Akustik,
Loeb Music Library
BDE
3 2044 041 149 57

Sammlung Gö

126 **Deutsche Stammeskunde** von D
Rudolf Much, Privatdozent an d
Universität Wien. Mit 2 Kar
und 2 Tafeln.

127 **Pflanzenbiologie** von Dr. W. Migula, Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Mit 50 Abb.

128 **Romanische Sprachwissenschaft** von Dr. Adolf Zauner, k. k. Realschulprofessor in Wien.

129 **Die Alpen** von Dr. Rob. Sieger, Privatdozent an der Universität u. Professor an der Exportakademie des k. k. Handelsmuseums in Wien. Mit 19 Abbildungen und 1 Karte.

130 **Das Öffentl. Unterrichtswesen Deutschlands in der Gegenwart** von Dr. Paul Stötzner, Gymnasialoberlehrer in Zwickau.

131 **Abriß der Biologie der Tiere I:** Entstehung und Weiterbildung der Tierwelt, Beziehungen zur organischen Natur von Dr. Heinr. Simroth, Professor an der Universität Leipzig. Mit 33 Abbildungen.

132 **Abriß der Biologie der Tiere II:** Beziehungen der Tiere zur organischen Natur von Dr. Heinr. Simroth, Professor an der Universität Leipzig. Mit 35 Abbildungen.

133 **Volkswirtschaftslehre** von Dr. Carl Johs. Fuchs, Professor an d. Universität Freiburg i. B.

134 **Deutsche Litteraturgeschichte des 19. Jahrhunderts I** von Dr. Carl Weitbrecht, Professor an der Technischen Hochschule Stuttgart.

135 **Deutsche Litteraturgeschichte des 19. Jahrhunderts II** v. Dr. Carl Weitbrecht, Professor an der Technischen Hochschule Stuttgart.

scher Frühzeit. In Auswahl mit Einleitungen u. Wörterbuch herausgegeben von Dr. Hermann Jantzen in Breslau.

138 **Simplicius Simplicissimus** von H. Jakob Christoffel v. Grimmelshausen. In Auswahl hrsg. v. Professor Dr. F. Bobertag, Dozent an der Universität Breslau.

139 **Kaufmännisches Rechnen I** von Richard Just, Oberlehrer an der Öffentlichen Handelslehranstalt der Dresdener Kaufmannschaft.

141 **Morphologie, Anatomie und Physiologie der Pflanzen.** Von Dr. W. Migula, Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Mit vielen Abbildungen.

142 **Darstellende Geometrie I.** Von Dr. Rob. Haußner, Professor a. d. Universität Gießen. Mit 100 Fig.

145 **Geschichte der Pädagogik** von Oberlehrer Dr. H. Weimer in Wiesbaden.

146 **Repetitorium und Aufgabensammlung zur Differentialrechnung** von Dr. Friedr. Junker, Professor am Realgymnasium und an der Realanstalt in Ulm. Mit 42 Figuren.

147 **Repetitorium und Aufgabensammlung z. Integralrechnung** von Dr. Friedrich Junker, Professor am Realgymnasium und an der Realanstalt in Ulm. Mit viel. Fig.

148 **Finanzwissenschaft** von Prof. Dr. A. van der Borght in Friedenau-Berlin.

Digitized by Google

Digitized by Google